

Índex

Resum	- 4 -
Resumen.....	- 4 -
Abstract.....	- 5 -
Agraïments	- 5 -
Capítol 1: Introducció	- 7 -
1.1. Motivació	- 7 -
1.2. Contextualització	- 7 -
1.3. Objectiu.....	- 7 -
Capítol 2: Estat del art de la infraestructura del vehicle elèctric ..	- 9 -
2.1. Introducció al vehicle elèctric	- 9 -
2.1.1. Alternatives al VCI.....	- 10 -
2.2. Introducció a les bateries.....	- 12 -
2.2.1. Tipus de bateries.....	- 12 -
2.2.2. Futur de les bateries.....	- 14 -
2.3. Estacions de recàrrega en l'actualitat	- 14 -
2.3.1. Tipus de càrrega	- 15 -
2.3.2. Situació a Espanya	- 17 -
Capítol 3: Dimensionament de la estació de recàrrega.....	- 19 -
3.1. Introducció	- 19 -
3.2. Anàlisi de cues probabilístic.....	- 23 -
3.2.1. Anàlisi probabilístic pels turismes	- 26 -
3.3. Conclusions de l'anàlisi de cues	- 29 -
Capítol 4: Optimització de la recàrrega lenta	- 31 -
4.1. Introducció	- 31 -
4.2. Model de l'algoritme.....	- 32 -
4.3. Estructura de l'algoritme.....	- 38 -
4.3.1. Conjunt d'índexs del programa.....	- 38 -
4.3.2. Declaració de les dades.....	- 38 -
4.3.3. Declaració de les variables	- 40 -
4.3.4. Definició i declaració de les equacions i restriccions	- 40 -
4.3.5. Model i solver	- 41 -

4.3.6.	Modificacions del programa pels altres escenaris	41 -
4.4.	Resultats de l'optimització.....	42 -
4.4.1.	Escenaris del 80% i del 100% del SOC al final de la recàrrega diària	42 -
4.4.2.	Escenari sense controlar.....	44 -
4.5.	Estalvi econòmic potencial	45 -
4.6.	Conclusions de l'optimització	47 -
Capítol 5: Disseny del control d'un punt de recàrrega ràpida		48 -
5.1.	Introducció	48 -
5.1.1.	Introducció als convertidors.....	49 -
5.2.	Xarxa	53 -
5.2.1.	Transformada de Park.....	53 -
5.3.	Convertidor AC/DC costat xarxa	56 -
5.3.1.	Model simplificat del convertidor AC/DC	56 -
5.3.2.	Control VSC costat xarxa.....	59 -
5.4.	Bateria	68 -
5.5.	Convertidor DC/DC bidireccional	69 -
5.5.1.	Model Simplificat.....	70 -
5.5.2.	Control de la tensió del bus de la bateria.....	70 -
5.5.3.	Simulació del convertidor DC/DC.....	71 -
5.6.	Punt de càrrega	74 -
5.6.1.	Introducció.....	74 -
5.6.2.	Definició de les variables.....	75 -
5.6.3.	Resultats de la simulació.....	77 -
5.7.	Conclusions de la simulació	85 -
Capítol 6: Conclusions		86 -
6.1.	Treballs futurs	87 -
Pressupost.....		88 -
Capítol 7: Bibliografia		89 -
7.1.	Referències bibliogràfiques.....	89 -
7.2.	Bibliografia de consulta.....	90 -

Resum

El present projecte pretén mostrar els avantatges dels vehicles elèctrics en front els convencionals en una flota de 17 vehicles de la Diputació de Barcelona.

En primer lloc, s'analitza l'estat de l'art de les diferents parts que componen la infraestructura de la mobilitat elèctrica amb les seves respectives tecnologies.

En segon lloc, s'introdueix en tres capítols: al primer capítol es calcula el nombre de punts de càrrega necessaris per a la recàrrega a partir de l'anàlisi de cues probabilístiques en base a la utilització actual de la flota. En el segon capítol, s'optimitza la gestió de la recàrrega per tal d'obtenir un estalvi econòmic en diversos escenaris: els dos primers minimitzen el cost per el 80 i 100% del estat de càrrega (SOC) de les bateries, el següent maximitza el SOC per el 100% i per acabar, es dona un exemple d'estalvi econòmic. Els diferents escenaris s'han programat mitjançant el software GAMS[®]. A l'últim capítol, s'utilitza el software Matlab/Simulink[®] per dissenyar el control d'un punt de càrrega ràpida.

Per acabar, s'extrauen les conclusions dels resultats i es defineixen possibles treballs futurs per ampliar el projecte.

Resumen

El presente proyecto pretende mostrar las ventajas de los vehículos eléctricos frente los convencionales en una flota de 17 vehículos de la Diputación de Barcelona. En primer lugar, se analizará el estado del arte de las diferentes partes que componen la infraestructura de la movilidad eléctrica con sus respectivas tecnologías.

En segundo lugar, se introduce en tres capítulos: el primero capítulo calcula el número de puntos de carga necesarios para la recarga a partir del análisis de colas probabilísticas en base a la utilización actual de la flota. En el segundo capítulo, se optimiza la gestión de la recarga con tal de obtener un ahorro económico en una diversidad de escenarios: Los dos primeros minimizan el coste el 80 y 100% del estado de la carga (SOC) de las baterías, el siguiente maximiza el SOC para el 100% y para acabar se da un ejemplo de ahorro económico. Los diferentes escenarios se han programado mediante la utilización del software GAMS[®]. En el último capítulo, se utiliza el software Matlab/Simulink[®] para diseñar el control de un punto de recarga rápida.

Para finalizar, se extraen las conclusiones de los resultados y se definen posibles trabajos futuros para ampliar el proyecto.

Abstract

This project aims to show the advantages of electric vehicles when compared to the conventional ones through a 17-car fleet of the Barcelona Provincial Council.

First of all, the state of the art of the different parts that make up the electric mobility infrastructure with the respective technology is analysed.

Secondly, three chapters are introduced: in the first chapter, the required number of charge points for the recharge is calculated through a probabilistic queuing analysis on the basis of the use of the existing fleet. In the second chapter, the recharge management is optimized to obtain financial savings in a variety of scenarios: The first two scenarios minimise the cost for the 80 and 100% of the state of charge (SOC) from batteries, the next one maximises the SOC for the 100% and, finally, an example of financial saving is given. The different scenarios are programmed by using the GAMS[®] software. In the last chapter, Matlab/Simulink[®] software is used to design the control of the fast charging point.

To end up, the conclusions of the results are drawn and set for future work proposals to enlarge this project.

Agraïments

Agrair el constant suport de tota la meua família que en tot moment m'han mostrat el seu recolzament, ajut i interès.

Agrair la confiança i els ànims de totes aquelles persones properes que sempre han cregut en mi.

Agrair a la diputació de Barcelona, en especial a Luis Javier Gracia Fando, per les dades referents als vehicles.

I per últim, a tot el CITCEA, que m'han acollit durant tot el projecte i sobretot a la atenció i els consells d'en Eduardo Prieto Araujo i d'en Pol Olivella Rosell, els tutors del projecte i que han cregut amb ell des de el principi.

Capítol 1: Introducció

1.1. Motivació

Gràcies a la col·laboració amb el grup d'investigació del CITCEA-UPC, el present projecte arranca amb la voluntat d'adquirir nous coneixements relacionats amb el dimensionament i l'optimització de la recàrrega d'una flota de vehicles elèctrics (VE) i el posterior disseny d'un punt de càrrega ràpida.

Les dades amb les que es treballen han sigut cedides per la Diputació de Barcelona, la qual ha donat la informació de la flota gestionada des del recinte de l'Escola Industrial de Barcelona que paga uns 50 cotxes. Per el projecte, només es tenen en compte 17, els quals són els que estacionen al mateix recinte. Afegir que gràcies a aquestes dades, el projecte pot ser més versemblant donant-li una motivació extra a la hora d'executar-lo.

Així doncs, poc a poc s'han anat marcant els objectius de cada capítol i l'abast que tindria aquest projecte i el treball de fi de grau.

1.2. Contextualització

En un món mogut per el combustible fòssil, la forma en que les persones es mouen sembla passar a un segon terme, però l'any 2014, segon l'institut americà d'energia, el 28% del consum total d'energia correspon al transport, amb un important pes del vehicle privat impulsat per combustibles derivats del petroli. Per això, amb l'increment del consum dels grans països en desenvolupament, com Xina o Brasil, és de vital importància comença a canviar la nostre mentalitat i donar entrada a les noves tecnologies molt més eficients.

1.3. Objectiu

L'objectiu del primer punt és entendre la situació actual tant del vehicles de motorització alternativa, les bateries utilitzades en els VE, les estacions de recàrrega com en els convertidors de potència.

A continuació, es dimensiona els punts de càrrega necessaris per a la recàrrega de la flota substituïda. En els següent capítol, s'optimitza la recàrrega de la flota dimensionada anteriorment. Per últim, es dissenya el control del punt de càrrega ràpida.

Gantt del projecte

En tot projecte és molt important la distribució correcta i ordenada de les feines a dur a terme, per aquest motiu s'ha optat per realitzar un gannt de les diferents parts per millorar l'organització i facilitar la feina del projectista.

Són dos Gannts que combinats es pot deduir el temps total en dies que s'ha trigat en realitzar el projecte: el primer està referit en la part de dimensionament i optimització mentre que el segon està enfocat a la part de la simulació dinàmica.

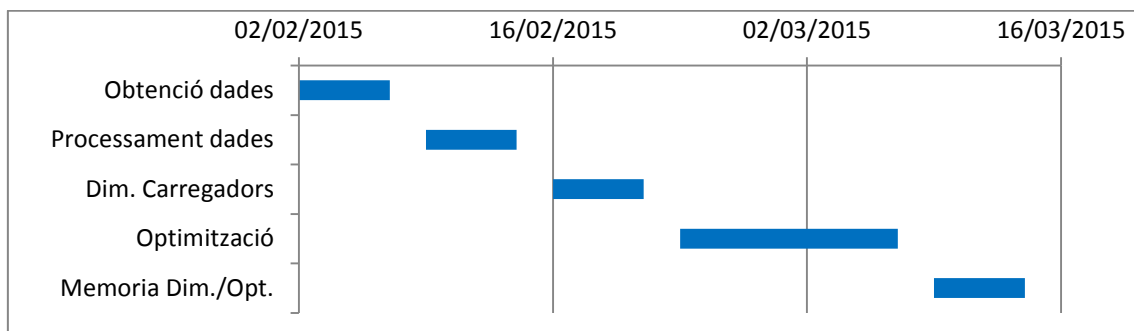


Figura 1. Gantt de la part de dimensionament i de l'optimització.

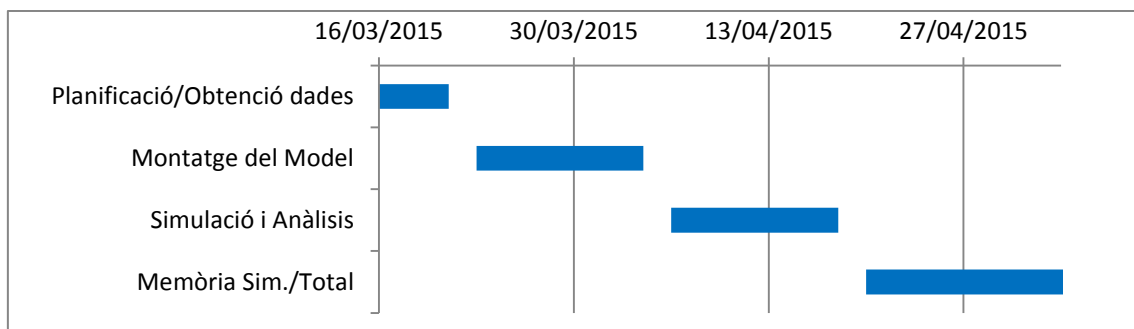


Figura 2. Gantt de la part de dimensionament de la simulació dinàmica.

El temps total per realitzar aquest projecte, ha estat de 14 setmanes. S'ha de afegir que prèviament al inici del projecte, es van passar 4 mesos, des de l'octubre 2014 fins gener 2015, per obtenir les dades de la diputació. No s'ha inclòs en el diagrama degut a que el temps és molt relatiu per cada administració i/o empresa.

Capítol 2:

Estat del art de la infraestructura del vehicle elèctric

2.1. Introducció al vehicle elèctric

El vehicle elèctric (VE) ja va aparèixer a finals del segle XIX, concretament el 1881 quan el francès Gustave Trouvé va dissenyar un primer tricicle amb motor elèctric de 160 kg. Li van seguir molts altres tricicles, però no va ser fins el 1890 que es va construir el primer VE de quatre rodes per l'enginyer William Morrison. Aquest VE ja era molt més pesat (1931 kg), tenia 3 CV de potència amb una velocitat màxima de 22 km/h i s'alimentava d'unes bateries de plom. Però a l'entrada del segle XX, degut a la facilitat de l'acumulació d'energia que dona el petroli, la indústria va decantar-se pel vehicle de combustió interna (VCI). Això és degut a que gràcies a la invenció de "starter" el 1912 per Charles Ketterin, la immensa revolució en les cadenes de muntatge de Henry Ford amb el seu Model T i la facilitat de transport i distribució del combustible a zones més aïllades de les ciutats, fa que el VE no pugui competir de tu a tu amb el VCI.

No va ser fins la dècada dels 70, amb les dues crisis del petroli del 73 i 79, que les energies renovables reben un important boom per tal de reduir la dependència econòmica i energètica del exterior. Això implicava que es comencessin a buscar alternatives reals al VCI i significà un important impuls per el VE amb l'aparició de nous models com el EV1 de General Motors, que va ser distribuït en el sistema de renting. En aquell moment les raons eren econòmiques, així que quan el preu del petroli es va tornar a estabilitzar, els mateixos creadors del EV1 es van encarregar de fer-lo desaparèixer poc a poc.

Tot i això, les grans companyies del món de l'automoció van continuar investigant com fer rendible aquesta forma alternativa de mobilitat. Així va ser que l'any 1997, Toyota va llançar al marcat la primera iteració del seu híbrid, el Prius. Aquest model només es va veure a Japó, ja que la normativa en aquella època es va modificar acotant pràcticament al sector del transport pesant els motor dièlsels, degut al augment de la contaminació, sobretot NO_x, en les grans ciutats sobre poblades del país. Veient que va ser un èxit, Toyota va decidir que la segona generació seria a

nivell mundial sent un èxit a EE.UU. i entrant al mercat europeu poc a poc fins a entrar definitivament amb la tercera generació llançada el 2009.

Pel que fa el VE, fins la entrada del nou mil·lenni, eren prototips que no veurien la llum degut al seu alt cos, però al segle XXI, degut a la gran conscienciació de la població mundial, comencen a aparèixer noves marques que aposten per el VE com única via, com és Tesla Motorsport, que el 2008 treu al mercat un esportiu elèctric anomenat Tesla Roadster amb uns 300 km d'autonomia. Però no només les petites grans empreses treuen models elèctrics, sinó que marques com Nissan treuen models amb prestacions similars als VCI actuals. EL 2010 surt el Nissan Leaf a un preu suficientment competitiu per fer-li front al mercat ja establert.

Si el fet de que ja es poden produir a un preu competitiu s'afegeix que molts governs estan promocionant l'ús d'aquest nou paradigma de mobilitat, fa que la inserció del VE al sistema sigui present avui en dia a la nostre societat tal i com ho demostren les vendes a Noruega del Nissan Leaf on representen sobre un 25% dels vehicles matriculats compatint de tu a tu amb el VW Golf.

2.1.1. Alternatives al VCI

Avui en dia existeixen diverses mecàniques que pretenen substituir el VCI a un motor més eficient. En el mercat, destaquen tres per sobre les altres:

- Vehicles híbrids-elèctrics (HEV) i endollables (PHEV): Són els que més mercat tenen, ja que porten més temps venent-se i en certs mercats estan molt consolidats. Un clar exemple és el Toyota Prius, disponible en les dues versions. El seu funcionament es basa en la unió en la part motriu d'una mecànica convencional amb un motor elèctric (Figura 3), és a dir, dues motoritzacions en paral·lel.

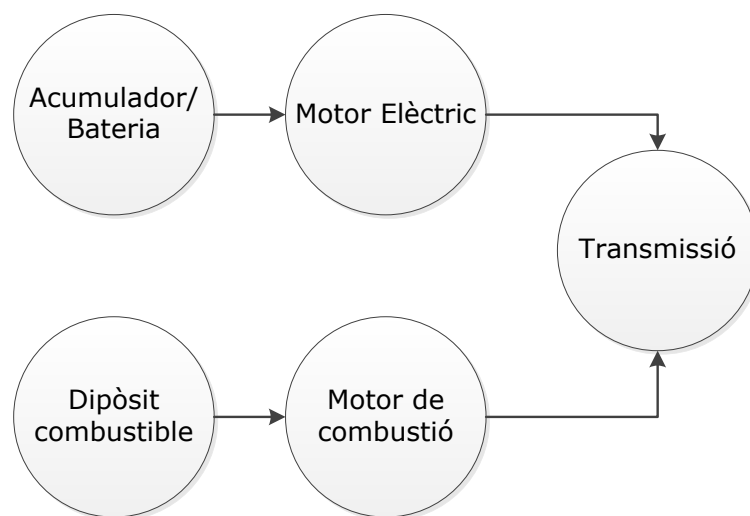


Figura 3. Esquema bàsic d'un HEV.

Aquesta configuració permet conduir en mode completament elèctric durant un curt període de temps. Gràcies aquest fet, la conducció a baixes velocitats, ja sigui en un pàrquing o en les sortides dels semàfors, es solen produir sense cremar combustible. També destaquen els diversos sistemes de regeneració d'energia que recarreguen els acumuladors automàticament en cada frenada.

Pel que fa els PHEV, són molt similars als anteriors amb la diferència que els acumuladors són més grans i permeten majors autonomies elèctriques (fins uns 25 km) que els fan molt eficients en consums mixtos, ja que disposen de diversos modes de conducció que s'adapten segons les necessitats, per exemple, només utilitzar el motor elèctric que accelerades fortes o quan s'arriba a un nucli urbà.

Degut a disposar capacitats més elevades, permeten la recàrrega convencional com un elèctric pur.

- Vehicles elèctrics d'autonomia extensa (REEV): En aquest cas, l'únic motor que dona tracció a les rodes és l'elèctric, més eficient que els seus homòlegs de combustió. Com es pot observar a la figura 4 El motor de combustió només funciona quan el nivell de càrrega de la bateria (SOC) és crític, per tant, no dona força motriu.

Les bateries d'aquests vehicles són semblants a les d'un elèctric pur amb l'afegit que disposen d'un dipòsit de combustible per tal d'augmentar l'autonomia de les bateries en el cas que fos necessari.

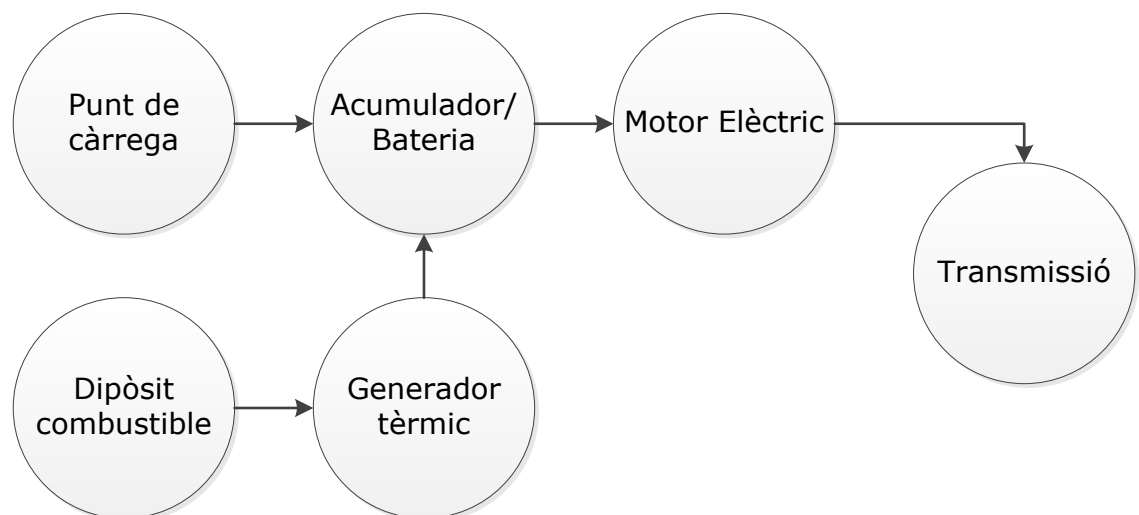


Figura 4. Esquema bàsic d'un REEV.

Degut a les seves característiques, la conducció es totalment elèctrica a no ser que es superin els quilòmetres límit de l'acumulador, permetent menys emissions locals en la gran majoria de desplaçaments diaris inferiors als 100 km. El BMW i3 n'és un clar exemple.

El gran avantatge és que el motor de combustió es pot fer servir sempre en el seu règim més òptim de funcionament aconseguint els rendiments més elevats d'ambdues tecnologies.

- Vehicles elèctrics purs (VEP): Tal com indica el seu nom, aquests són totalment elèctrics sense cap mena de part tèrmica. Les bateries són molt grans ja que no tenen una segona font d'energia a utilitzar en cas d'emergència.

El fet de només disposar de l'energia acumulada a les bateries durant la recàrrega, fa que avui en dia existeixi el terme *Range anxiety*. Significa que l'usuari, al desconèixer el funcionament correcte d'aquesta nova tecnologia, pot tenir por a quedar-se a mig camí dels seus trajectes i per tant, acabaria infrutilitzant el VE. Aquesta, junt amb la necessitat de disposar de més autonomia per viatges llargs, fa que el desenvolupament de les anomenades "electrolineres", ja siguin de intercanvi de bateries o de estacions de recàrrega ultra-ràpida, puguin ser el punt de sortida definitiu pel VE.

2.2. Introducció a les bateries

Tot i que l'escassa autonomia dels VE és un dels principals culpables de la mala comercialització d'aquests tipus de vehicles, el factor més important és el preu dels mateixos. Només que es faci un petit estudi sobre el cost de cada una de les parts dels VEs, ràpidament es dedueix que el principal culpable d'aquest sobrepreu ve donat per les bateries.

Actualment, és el tendó d'Aquil·les d'aquesta tecnologia i fins que el preu no s'equilibri en un nivell competitiu envers els VCI, els VE estan condemnats a tenir una petita part del pastís de la mobilitat. Tot i que hi ha solucions que permeten reduir les dimensions de les bateries, com un motor auxiliar que faci de generador o les piles de combustible, no deixen de ser pegats o encareixen encara més el producte respectivament.

Així doncs, com que s'han de transportar grans quantitats d'energia en el vehicle, s'ha d'optar per la que millor s'adapti actualment a les necessitats.

2.2.1. Tipus de bateries

Plom-àcid

Són molt més barates que les de liti o les de níquel, i varen ser utilitzades durant molts anys com a bateries dels VCI. També disposen d'una bona relació potència/pes, bon comportament en un ampli rang de temperatures, baixa auto descàrrega i són senzilles de reciclar. L'única gran pega és la baixa densitat energètica que ronda els 40 Wh/kg.

Níquel-metall

Encara utilitzades als VCI com a bateria i les elegides per els híbrids com el Toyota Prius fins la última generació, destaquen per un cicle de vida llarg i poc impacte mediambiental si són ben reciclades. La potència específica és correcta però amb una densitat de 60 Wh/kg, encara estan lluny de les de liti. La gran pega és un gran índex d'auto descàrrega en períodes d'inactivitat i un preu un pel elevat degut a incorporar materials de les terres rares en l'elèctrode positiu.

Ió-Liti

La gran varietat d'aquest tipus fa que siguin molt versàtils segons les necessitats de cada cas. Superen en tots els camps a les dues anteriors excepte en el preu. També són menys robustes a les variacions de voltatge que les obliga a dissenyar algoritmes complexos i costosos per a la gestió de càrrega i descàrrega per el seu correcte funcionament. Les principals són:

- Liti-Cobalt [Li-CoO_2]: Són de les millors en termes de densitat energètica (170-185 Wh/kg), per tant ideals per a productes que necessiten un bon emmagatzematge en poc pes com mòbils o portàtils. El gran defecte són els pocs cicles de recàrrega que suporten, aproximadament 500, i que en cas d'accidents poden encadenar reaccions exotèrmiques produint incendis o fins i tot explosions, per tant s'han descartat per la utilització en el sector del automòbil.
- Liti-Ferro-Fosfat [Li-Fe-PO_2]: La densitat energètica ja baixa considerablement (90-125 Wh/kg). Disposen d'una major estabilitat tèrmica i química i duren fins a uns 2000 cicles de recàrrega, fent-les segures i duradores. Són també les més econòmiques i s'utilitzen en la producció dels HEVs i els VEs.
- Liti-Manganès [$\text{Li-Mn}_2\text{O}_2$]: Molt semblants a les anteriors, amb una densitat energètica una mica inferior (90-110 Wh/kg) però suporten un major voltatge. L'avantatge és que el manganès no és contaminant si es produeix un basament.
- Liti-Níquel-Cobalt-Manganès [$\text{Li-Ni}_x\text{-Co}_y\text{-Mn}_z\text{O}_2$]: Tenen un gran relació entre rendiment i costos. Segons les proporcions dels elements, la seva densitat energètica pot variar des de 155 fins 190 Wh/kg. Són les que s'utilitzen massivament per els VE ja que poden suportar fins a 1500 cicles de recàrrega.
- Liti-Titani [$\text{Li}_4\text{-Ti}_5\text{O}_{12}$]: Aguanten fins a 12000 cicles de recàrrega però el preu que paguen és una baixa densitat energètica (65-100 Wh/kg) i un cost molt elevat degut al titani que utilitza.

2.2.2. Futur de les bateries

Bateries de grafè

L'ús del grafè a les bateries promet ser una revolució en els sector, ja que anuncia unes característiques molts atractives:

- Una densitat energètica que ronda els 600 Wh/kg.
- Una vida útil que podria doblar les actuals bateries de Liti utilitzades en els VE.
- Admet una major potència en la recàrrega i per tant, es redueixen els temps d'espera.
- Prometen ser un 77% més econòmiques que les de Ió-Liti.

Bateries d'alumini-aire

Encara en desenvolupament com les anteriors, permet substituir el costós liti per alumini i poden aconseguir una densitat energètica del ordre del 8 kWh/kg.

El gran problema és que en la reacció, es consumeix l'hidrogen de l'aigua i es produeix l'oxidació del metall. Per tant, a priori, serien piles més que bateries per el fet que no es poden recarregar.

Nous estudis han demostrat que gracies a una capa de materials ceràmics carbonosos, aquesta oxidació s'evitaria i si que es podria recarregar. L'única pega seria que l'aigua, al perdre poc a poc l'hidrogen, s'hauria de substituir cada 15 dies.

2.3. Estacions de recàrrega en l'actualitat

La recàrrega dels VEs és el punt més important avui en dia, ja que un VCI pot disposar del combustible amb pocs minuts reomplint els dipòsits de gasolina, mentre que la recàrrega completa d'un VE pot durar hores si es fa servir una xarxa domèstica o un punt de càrrega de baixa potència. Això no hauria de ser un problema més que per a viatges superiors als 150 km on l'autonomia dels vehicles no hi arriba i per tant es necessitaria una recàrrega el més ràpid possible. Des de fa cert temps, ja es disposen de diferents càrregues ràpides que permeten escurçar el temps de càrrega considerablement (de hores a minuts) per recarregar-los fins el 80% del SOC.

Tot i existir, el fet de que no s'hagi estandarditzat des de un principi aquest procés, cada empresa/companyia a desenvolupat el seu propi carregador, per tant es disposen de una extensa multitud d'endolls tot i que poc a poc es va legislant per tal d'estandarditzar-los.

2.3.1. Tipus de càrrega

La classificació més important en aquest aspecte ve donada per la normativa IEC 61851, que diferencia l'arquitectura de la càrrega i els sistemes utilitzats en ella.

Les normes internacionals que es fan servir per la recàrrega són:

- La anteriorment anomenada IEC 61851: Defineix el sistema conductiu de càrrega.
- IEC 62196: Regula els endolls, acobladors i entrades pels sistemes conductius.
- IEC 61980: Que defineix els sistemes de càrrega inductiva.

Cal destacar que la majoria de sistemes de recàrrega fan servir els mètodes de càrrega conductiva, ja que és més eficient, fiable, barata i de fàcil implementació, ja que es basa en un cable i un endoll estandarditzat, mentre que el sistema inductiu encara està en vies de desenvolupament per tal de reduir els costos i la seva complexitat, encara que té avantatges respecte el conductiu ja que no hi ha contacte físic entre el punt de càrrega i el VE.

Segons la normativa IEC 61851, es poden classificar 4 modes segons la velocitat de càrrega:

- Mode 1
És el sistema més senzill. Consisteix en endollar el VE a la xarxa corrent d'un edifici que no excedeixi els 16A a 230V (monofàsic) o 480V (trifàsic). Era el més utilitzat però la modificació de les normatives europees en relació a la seguretat, exigien que totes les instal·lacions estiguessin connectades a terra fet que no totes les instal·lacions ho complien.
- Mode 2
És el que actualment s'utilitza domèsticament un cop descartat el mode 1. En aquest mode es poden arribar fins els 32A amb els mateixos nivells de tensió, per tant es guanya potència.

La principal diferència entre l'anterior mode és que disposa d'un sistema de protecció en el mateix cable de connexió, el Sistema de Alimentació per a Vehicles Elèctrics (SAVE), que consisteix en un dispositiu d'interrupció combinat de falla a terra i interruptor automàtic, amb funció de limitació de corrent màxima. Es molt semblant als ICP que hi ha al quadre elèctric a les cases, que salta cada cop que es detecta una falla en el terra.

- Mode 3 conductiu

En aquest cas, el sistema de seguretat SAVE es troba incorporat en el mateix punt de càrrega. Destaca per ser el mètode més segur per protegir el cable entre el VE i la xarxa elèctrica.

Al ser un mètode més segur, es possible augmentar les potències entregades fent que les velocitats de càrrega disminueixi. Es poden classificar com (Austrian Energy Agency, 2013):

- Càrrega lenta: Molt semblant al mode 2 però pot adaptar el corrent a 10, 13 o 16A per donar potències entre 2,3-3,7 kW. Permet augmentar aquesta potència fins el doble (32A i 7,2kW).
- Càrrega semi-ràpida: Es tracta d'una càrrega de 22 kW a 32A en corrent alterna i a diferència de la càrrega ràpida no necessita una infraestructura específica.
És una càrrega ideal per a centres comercials o als carrers, on els EV poden passar-se unes poques hores aparcats i no es requereix d'una càrrega ràpida.
- Càrrega ràpida: Es tracta de la recàrrega de 63A i 43 kW. Es va començar a introduir en els VE del 2013.

- Mode 3 inductiu

En aquest mode, l'energia es transfereix mitjançant un acoblament inductiu entre el transmissor del terra amb el receptor del VE. Com no hi ha cap cable físic entre el cotxe i el punt de càrrega, la comunicació entre ells es produeix pel protocol Wireless.

Està en una fase molt experimental degut a les majors pèrdues comparat amb els sistemes conductius, però les seves avantatges les fa molt interessants, sobretot en la part de seguretat, on el risc d'electrocucions es veu reduït al mínim. Una altre avantatge seria la possibilitat de instal·lar-les sota les autopistes per a que els VE poguessin anar recarregant-se durant el viatge o fer un sostre inductiu a les marquesines dels autobusos per tal de poder reduir les dimensions de les bateries degut a les constants recàrregues.

- Mode 4 DC

És el mètode utilitzat per recarregar grans quantitats d'energia en pocs minuts. Per poder-se instal·lar, es requereix una obra i inversions majors, com per exemple un transformador de gran potència. N'hi ha de dos tipus:

- Càrrega ràpida: El mode de càrrega en corrent continua i exterior al cotxe. Existeixen diferents endolls, un dels més utilitzats per les marques com Nissan o Mitsubishi, és el

CHAdEMO que pot donar uns 50 kW de potència a un voltatge DC de 500V i intensitat de 125 A.

Pot recarregar entre 15-30 min VE de dimissions mitges.

- Carga Ultra-ràpida: Qualsevols tipologia de càrrega superior a 50 kW es considera d'aquest tipus. Els VEs que la vulguin incorporar han de ser adaptats per garantir la seguretat de la recàrrega.

Un clar exemple és el Tesla Model S, que amb una bateria de fins 85 kWh, són capaços de carregar-se a potències de 90-120 kW. La mateixa empresa ha dissenyat un model d'electrolineres que disposen dels carregadors per poder fer front a aquestes demandes. Cada cop esta més extensa, destacant que pot fer-se un viatge de costa a costa dels EE.UU. només parant en aquest tipus d'electrolineres amb el seu VE.

- Canvi de bateries

L'últim sistema a considerar, és el intercanvi de bateries dissenyat per empreses com Better Place[®]. Aquest sistema permet recuperar la totalitat de la bateria en menys de 3 minuts, ja que simplement es canvia la bateria com si fossin unes piles.

És un sistema que permet que els VEs es venguessin sense bateries, que és la part que fa encarir els VE, i serien gestionades per la mateixa empresa que fa l'intercanvi, optimitzant la recàrrega segons la necessitat i les condicions del mercat elèctric.

Ara mateix, no és un sistema gens extens degut al alt cost d'inversió i que el concepte no ha acabat d'arribar a les persones, però ben fet, podria ser un gran sistema per deixar de banda el *range anxiety* i millorar la gestió de les bateries.

2.3.2. Situació a Espanya

El retràs amb l'aprovació de la norma ITC-BT-52 ha perjudicat greument la implementació del VE en massa al estat espanyol tot i les ajudes de fins a 5500€ del pla MOVELE per l'adquisició de vehicles elèctrics. Aquest normativa regula i permet la construcció de punts de càrrega en domicilis i pàrquing comunitaris, on esta pensat que la major part del VE en un futur es carreguin. Avui en dia, la majoria de punts de càrrega (PC) estan en centres comercials o estan a la via pública i encara no s'ha pogut aplicar de forma extensa la nova normativa i aquest retard en l'aprovació ha fet que no s'hagi pogut instal·lar gaires PC en pàrquings multipropietat on la falta de cohesió de les diferents normes feien que a nivell legal fos complicat arribar a un acord. En la figura 5 es pot veure que els punts de càrrega es centren a les àrees més poblades de la península ibèrica:



Figura 5. Punts de recàrrega a la península Ibèrica (electromaps, 2015).

Per acabar, la normativa europea IEC 62196-2 regula que l'estàndard per la recàrrega ha de ser el CCS a partir del 2018, sense vetar els altres sistemes com el CHAdeMO degut a la gran quantitat de VE ja disponibles amb aquesta tecnologia.



Figura 6. Connectors CHAdeMO (amunt) i CCS (a baix).

Capítol 3:

Dimensionament de la estació de recàrrega

3.1. Introducció

Per poder treballar amb dades reals, es van demanar les dades d'una flota de vehicles gestionats directament des del recinte. La Diputació de Barcelona va cedir la informació d'uns 50 vehicles, però només es van agafar 17 vehicles que són els gestionats des del recinte de l'Escola Industrial de Barcelona durant l'any 2014.

La distribució per tipus de vehicles de la flota és la següent:

Tipus de vehicle	Quantitat
HEV	3
Turisme	10
4x4	4

Taula 1. Tipologia de vehicles.

La distinció es produeix amb aquestes tres categories degut a que el consum mig entre elles (Figura 7) és suficientment diferent i per tal de fer la substitució, es té en compte el consum de cada VCI i les característiques dels serveis que realitza.

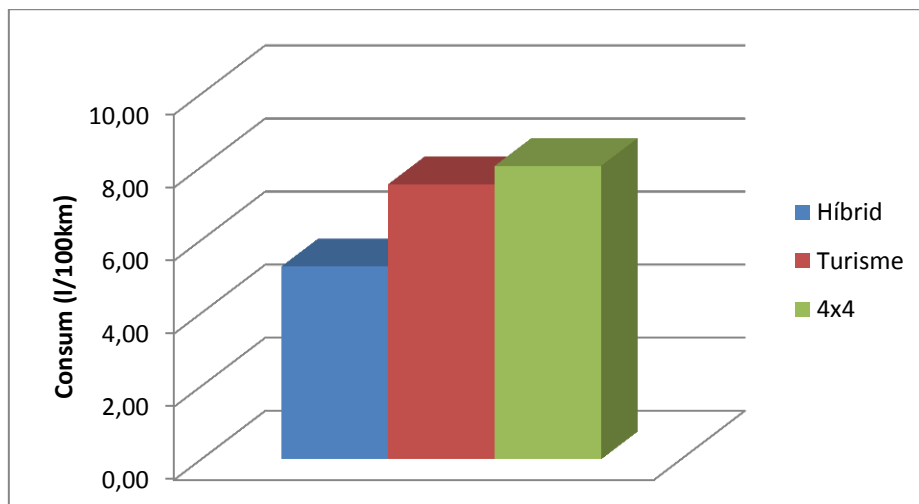


Figura 7. Consum mitjà de combustible de cada tipologia de VCI

Es pot observar que el consum entre els VCI (turismes i 4x4) independentment del seu combustible, consumeixen quantitats elevades, 7.53 i 8.03 litres cada 100 quilòmetres, mentre que els híbrids, que ja

disposen d'una combinació de motor elèctric amb un de combustió, permeten una conducció totalment elèctrica i per tant sense emissions, el consum mig baixa notablement fins els 5,28 l/100 km.

Per acabar, el consum mitja dels 4x4 s'aproxima tant als dels turismes degut a que són més utilitzats per fer llargs recorreguts ja que per ciutat es prioritzen híbrids i turismes, ja que sinó fos així els consums mitjans es dispararien a xifres per sobre dels 15 l/100 km.

Pel que fa el cost per quilòmetre:

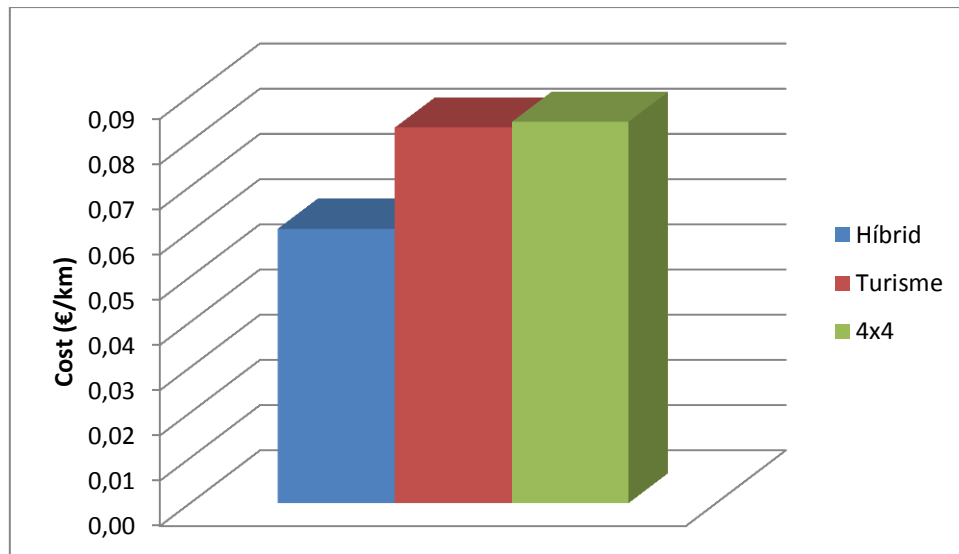


Figura 8. Cost per quilòmetre de cada tipologia de VCI.

A la figura 8 s'observa que el cost per quilòmetre baixa proporcionalment amb el consum de combustible, tot i que en el cas dels turismes, al utilitzar gasolina en la meitat dels vehicles, el cost tendeix a igualar-se amb els 4x4 sent encara una mica inferior.

Si aquest fet s'afegeix que el funcionament mecànic d'un HEV és molt més simplificat i simple (motor de gasolina atmosfèric petit, part elèctrica amb poques peces mecàniques,...) fa que el manteniment del mateix sigui bastant més barat que un dièsel o gasolina similar, es pot deduir que si el vehicle fos 100% elèctric es podria estalviar molt en temes econòmics.

Si es dona un cop d'ull a la distribució pel que fa sortides (Figura 9) i arribades (Figura 10) dels vehicles es pot veure que majoritàriament, els vehicles s'agafen a primera hora del matí i tornen a casa sobre el migdia. S'han de tenir en compte també aquells serveis que es produeixen per la tarda, ja que podrien utilitzar vehicles que ja han estat usats durant el matí.

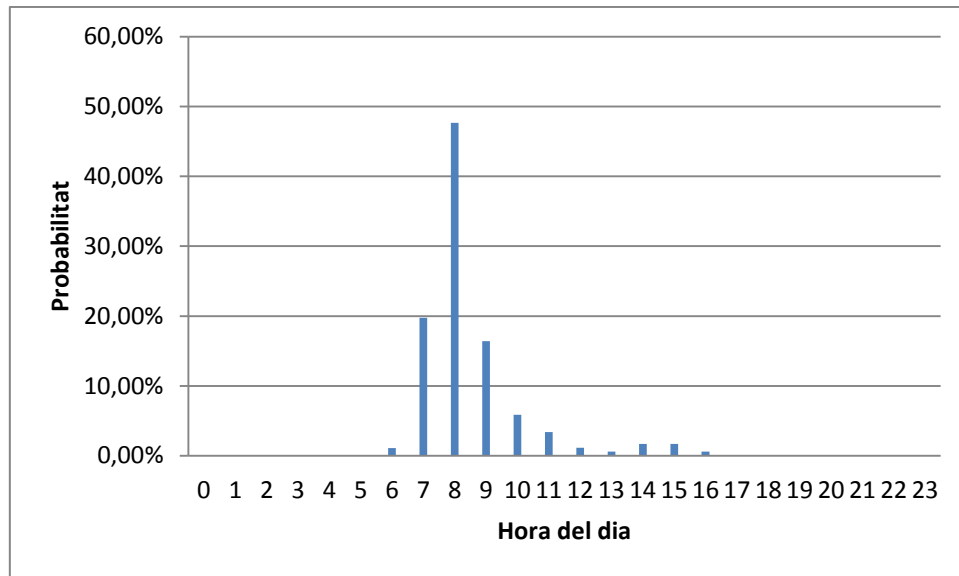


Figura 9. Probabilitat de l'hora de sortida dels turismes.

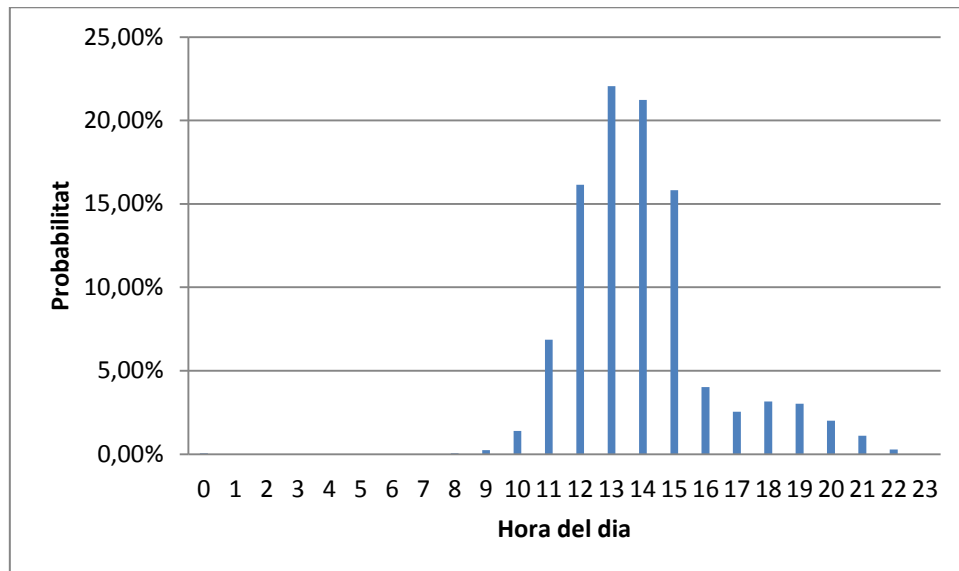


Figura 10. Probabilitat de l'hora d'arribada dels turismes.

Per tant, es pot observar que els vehicles es podrien recarregar majoritàriament durant el període nocturn on les tarifes elèctriques són més barates.

Per acabar, si s'analitzen els quilòmetres realitzats per cada servei:

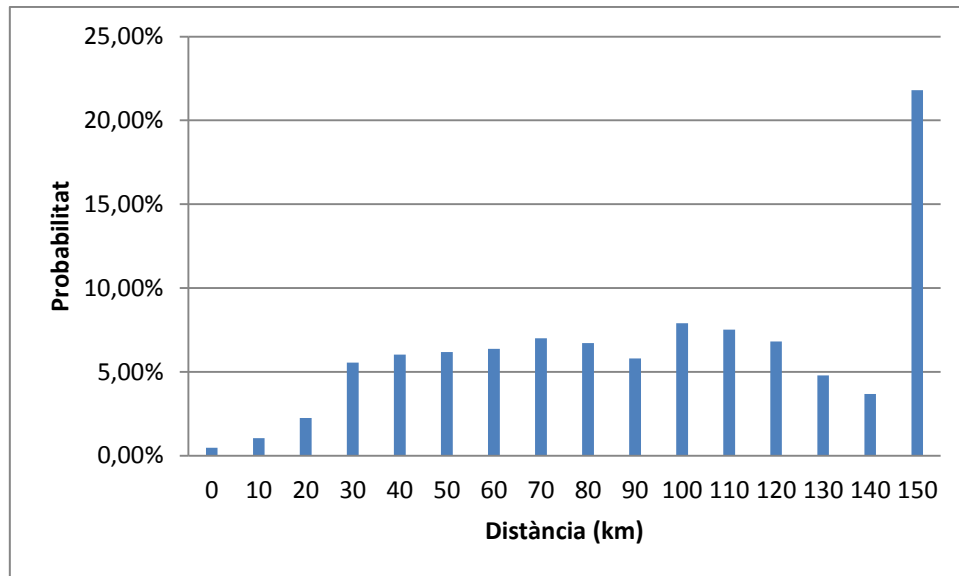


Figura 11. Probabilitat de realitzar certs quilòmetres per cada turisme.

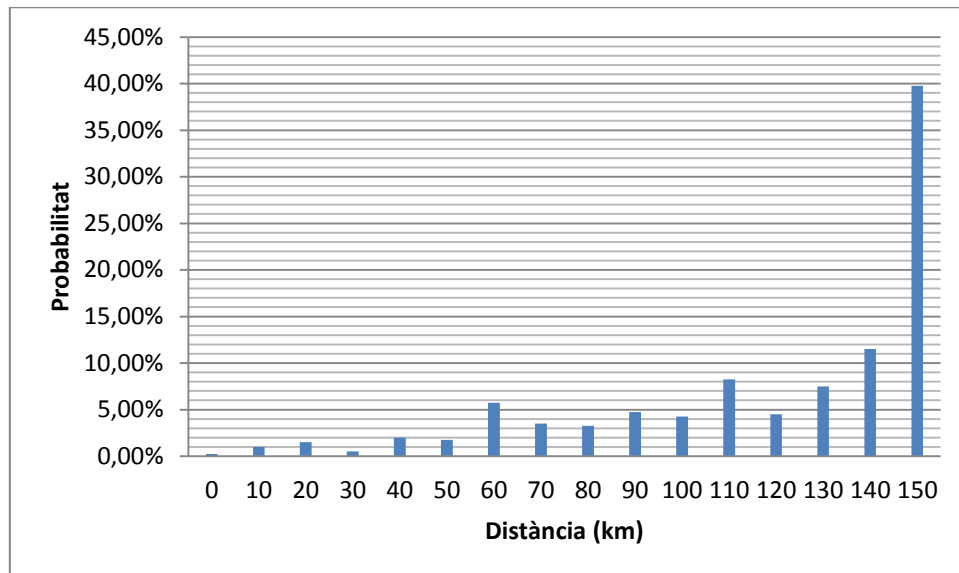


Figura 12. Probabilitat de realitzar certs quilòmetres per cada 4x4.

En el cas dels turismes (Figura 11), la gran majoria de viatges són de menys de 150 km, sent el 15% menys de 50 km i el 65% entre els 50-150 km. La resta, són superiors a 150 km.

Pel que fa els 4x4 (Figura 12), un 40% realitza els seus serveis a més de 150 km, mentre que un 55% els realitza entre 50-150 km, deixant un percentatge molt petit els recorreguts de menys de 50 km.

Substitució turismes

Com que els rangs de quilòmetres fets durant els serveis, no es aconsellable l'ús d'un VE estandarditzat, és a dir, s'aprofitaran les condicions dels recorreguts per tal d'elegir un balanç entre recorregut i capacitat de les bateries, ja que actualment els VE tenen entre 120-200 km d'autonomia i

per tant, molts no podrien realitzar els recorreguts sencers si no es disposa de una estació de recàrrega elèctrica a prop del lloc de destí. Anàlogament, tampoc es vol sobre dimensionar la flota fent servir VE amb bateries massa grans per la mobilitat urbana.

Per tant, a la taula 2, es separen els turismes i HEV en tres categories de VEs:

Distància (km)	Tipus de VE	Capacitat Bateria (kWh)	Potència (CV)	Velocitat Màxima (km/h)	Recàrrega Ràpida
<50	Renault Twizy	6,1	17	80	No
50<x<150	Nissan Leaf	24	109	144	Si
>150	Toyota Prius	---		180	No

Taula 2. Distribució dels VE a substituir segons la distància i les seves característiques.

S'ha decidit que en el cas dels vehicles que recorren més de 150 quilòmetres no es substituiran, ja que el sobre cost d'un PHEV o un REEN per poder cobrir les majors distàncies és excessiu i el Prius ja és un bon vehicle de baix consum. Només s'autoritzarà la recàrrega ràpida per els Nissan Leaf, degut a les grans bateries que disposa.

Substitució 4x4

Pel que fa els 4x4, a la taula 3 es defineix que per qualsevol distància es substituiran per un sol model:

Distància (km)	Tipus de VE	Capacitat Bateria (kWh)	Potència (CV)	Velocitat Màxima (km/h)	Recàrrega Ràpida
Qualsevol	Mitsubishi Outlander	8,4	206	170	No

Taula 3. VE elegit per substituir els 4x4.

L'Outlander és un 4x4 de tipologia PHEV amb una autonomia elèctrica màxima de 50 km, suficient per poder fer una conducció totalment elèctrica dins de ciutat i amb autonomia suficient gràcies al seu motor tèrmic per fer qualsevol recorregut.

3.2. Anàlisi de cues probabilístic

Per tal de determinar el temps i la longitud de la cua que haurien de fer els VEs per recarregar-se, es realitzarà, tal com és descriu en l'informe de (Farkas, C. and Prikler, L., març 2012) , un anàlisi probabilístic de la distribució de les arribades dels VEs al pàrquing de la diputació i poder decidir la quantitat de carregadors més òptim per el sistema.

Taxa d'arribades

La taxa d'arribades s'equipara a una distribució de tipus Poisson. Aquesta distribució s'expressa a partir d'una freqüència d'ocurrència mitja (λ), que és la probabilitat que succeeixi un cert nombre fets (k) durant un temps marcat.

$$f_x = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (1)$$

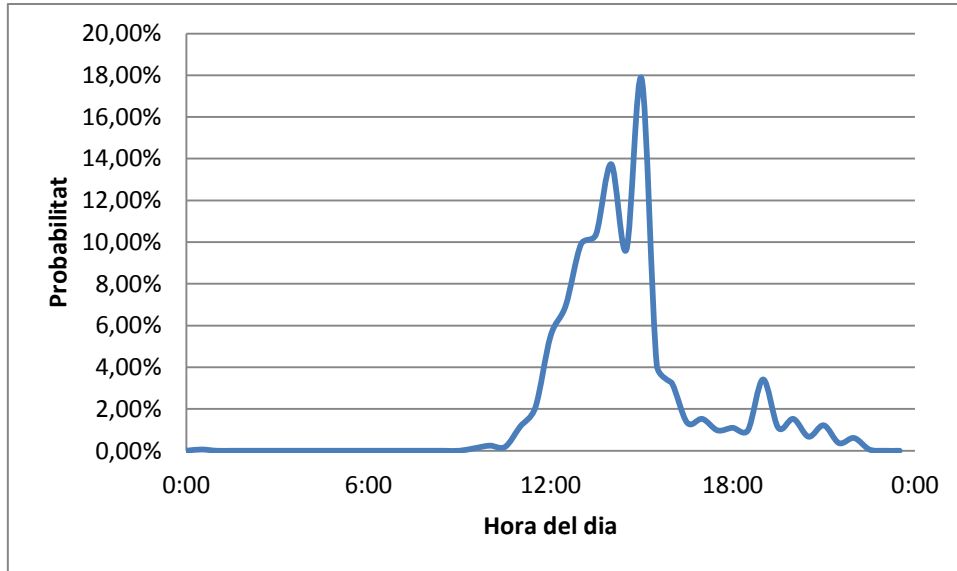


Figura 13. Exemple de Distribució de les arribades.

Tot i que es una variable molt dependent del flux de vehicles, s'agafa el cas més extrem, en l'exemple (Figura 13) és de 2,24 vehicles per hora (EV_h) que es produeix a les 15:00 hores. Això indica que com a mínim s'han de disposar de 3 punts de càrrega per poder absorbir el flux dels VEs. Per tant, la freqüència serà:

$$\lambda = \frac{1}{EV_h} \quad (2)$$

Temps de servei

La segona variable a destacar és el temps de servei per cada recàrrega (μ). Com que cada punt de càrrega és de 3,7 kW de potència, sabent les capacitats de les bateries dels vehicles donades en kWh que es disposen, es pot calcular un temps aproximat de cada recàrrega:

$$t_c = \frac{C_{bat}}{P_{carr}} \quad (3)$$

On:

$$\mu = \frac{1}{t_c} \quad (4)$$

Dimensionat del punt de recàrrega

Per poder dimensionar el punt on els VEs es recarregaran després de cada servei, s'han de definir un número de carregadors (c) i la capacitat màxima de vehicles (N) que s'hi poden acumular en tot l'aparcament. Per tant, els llocs d'espera, molt relatius en el nostre cas, es poden definir com a $N-c$.

Per tal de fer un dimensionament no gaire complicat, l'estratègia a seguir serà la FIFO (Olivella-Rosell, P., Villafafila-Robles, R., & Sumper, A., 2015), és a dir, el primer en arribar serà el primer en ser servit. És el sistema que es fa servir per les estacions de recàrrega ràpida per tal d'optimitzar-los. La gran diferència es que en el nostre cas, hi ha d'haver sempre un lloc d'espera ja que les places d'aparcament ha de ser més gran o igual que el nombre de vehicles disponibles per la diputació.

Un cop aclarit la particularitat del nostre cas, es procedeix al càlcul de carregadors òptims. Per començar, cal conèixer la probabilitat de que hi hagi n VE al sistema. Per a $n \leq c$ és:

$$P_n = \frac{(c \cdot \rho)^n}{n!} \cdot P_0 \quad (5)$$

Mentre que en el cas de $n > c$ és:

$$P_n = \frac{1}{c!} (c \cdot \rho)^c \cdot \rho^{n-c} \cdot P_0 \quad (6)$$

Sent ρ la densitat de l'ocupació del sistema, sent sempre menor que 1 per tal de que la cua sigui estable:

$$\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu} \quad (7)$$

I P_0 és la probabilitat de que no hi hagi cap VE al sistema:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^c \frac{1}{n!} (c \cdot \rho)^n + \frac{1}{c!} (c \cdot \rho)^c \sum_{n=c+1}^N \rho^{n-c} \right]^{-1} \quad (8)$$

S'ha de tenir en compte que el mínim de carregadors ve marcat per el pic en la gràfica de la distribució. És propi de cada cas, per tant, es definirà en el moment que es necessiti.

Per saber el temps o la longitud de la cua es necessita saber la probabilitat de que el sistema estigui ple:

$$P_N = \frac{1}{c!} (c \cdot \rho)^c \cdot \rho^{N-c} \cdot P_0 \quad (9)$$

Així, el temps mig d'espera per la recàrrega (W_q) ve definit com:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda(1 - P_N)} \quad (10)$$

On la longitud mitja de la cua (L_q) és:

$$L_q = \frac{(c \cdot \rho)^c}{c!(1 - \rho)^2} \cdot P_0 \cdot (1 - \rho^{N-c} - (N - c) \cdot \rho^{N-c} \cdot (1 - \rho)) \quad (11)$$

3.2.1. Anàlisi probabilístic pels turismes

El primer pas és buscar el nombre mínim de carregadors que es necessitaran. La distribució de les arribades és al següent:

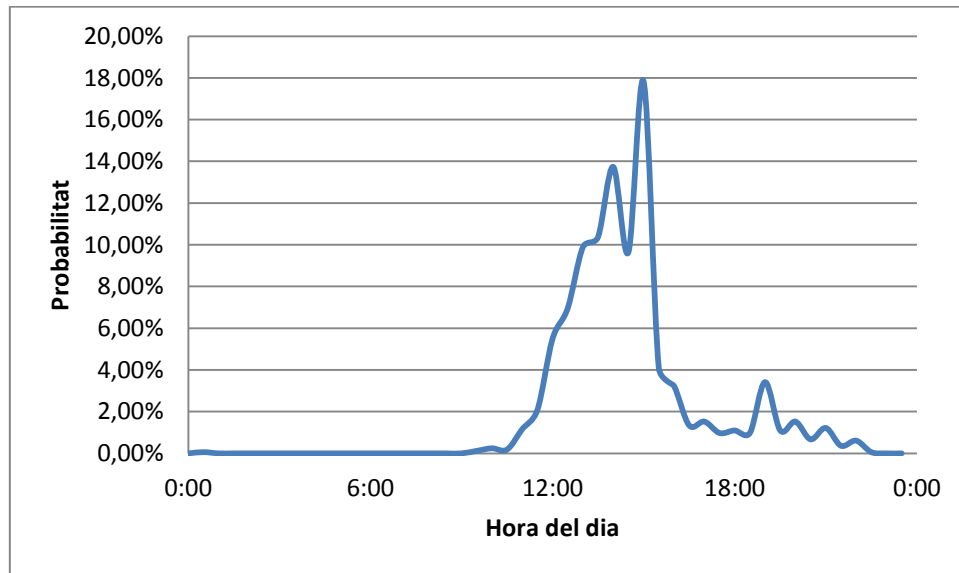


Figura 14. Distribució de les arribades dels turismes.

A la figura 14 es veu que el moment més crític del dia és a les 15:00 on s'arriba al 17,83% d'arribades. Si tenim en compte que durant un any hi han 261 dies laborables com a màxim i que els turismes fan 1638 serveis durant l'any, es pot deduir que en un dia es produeixen 6,28 desplaçaments. Per tant:

$$EV_h = 6,28 \cdot 17,83\% = 1,12 \frac{\text{arribades}}{30 \text{ min}} \rightarrow 2,24 \text{ arribades/h}$$

Per tant, el número mínim de carregadors serà de 3 i aplicant la formula (2) obtenim la taxa d'arribades:

$$\lambda = \frac{1}{2,24} = 0,45 \text{ 1/h}$$

Pel temps de servei, es calcula la distància mitja que produeixen els vehicles en els rangs establerts en l'apartat 3.1.

Distància de rang (km)	Nº serveis	Distància mitja (km)
x<50	233	35,87
50<x<150	1030	98,15

Taula 4. Distribució dels nombre de serveis segon la distància.

Si es té en compte el consum real en kWh dels VE de substitució (EPA 2015) i comptant la quantitat dels models que es substituiran per cada cas, es pot calcular un consum mig i buscar la profunditat de descàrrega de la bateria (DOC):

Model	Consum mig (kWh/100km)	Consum (kWh)	DOC	Nº de vehicles (%)
Renault Twizy	9,25	3,32	54,40%	0,2
Nissan Leaf	21,13	20,74	86,42%	0,8

Taula 5. Característiques de consum dels turismes substituïts.

Fent la mitja, es dedueix un DOC mig del 80%. Tenint en compte novament la capacitat mitja dels VE utilitzats, s'obté un temps de recàrrega de 4,66 hores per arribar al 80% de càrrega, per tant aplicant la fórmula (4):

$$\mu = \frac{1}{4,66} = 0,2144 \text{ } 1/h$$

Amb aquestes dades i aplicant les expressions (5) i (6), la probabilitat de tenir n VE és:

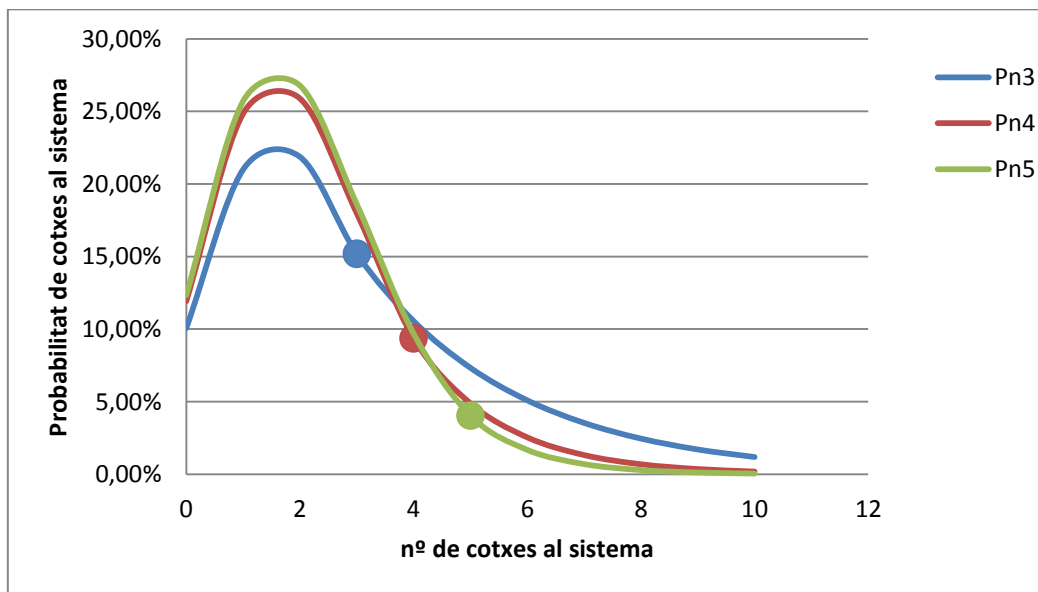


Figura 15. Probabilitat de que hi hagi n VE al sistema.

És pot veure a la figura 15, que la corba per a 3 carregadors, el sistema pot arribar a saturar-se, mentre que en els altre dos casos, hi ha un moment que sempre hi haurà lloc de sobres per poder endollar el VE.

Pel que fa els temps d'espera amb l'equació (10):

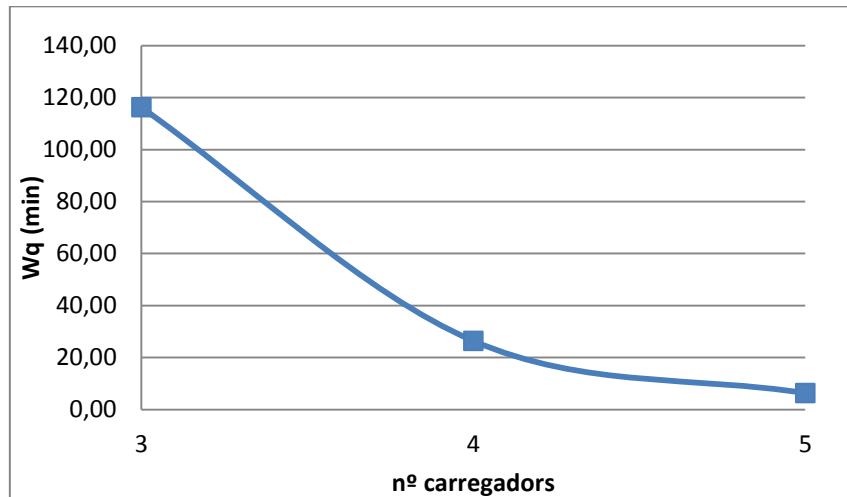


Figura 16. Temps d'espera mig degut el nombre de carregadors pels turismes.

S'observa que si només es disposa de 3 carregadors, el temps d'espera es dispara gairebé fins les dues hores, un temps massa elevat. Només introduint un sol carregador més, s'aconsegueix reduir el temps d'espera un 80% fins els 26 minuts que ja comença a ser un temps raonable. Si encara s'instal·lés un 5é carregador, el temps finalment baixaria fins els 6 minuts.

Per tant, només es tindran funcionant 4 carregadors simultàniament encara que hi hagi més VE endollats al sistema.

Com pot haver una probabilitat de que s'hagi d'utilitzar un VE dos cops al mateix dia, es decideix instal·lar un post de recàrrega ràpida a 50 kW per tenir-lo llest en menys de 30 min.

Si fem l'anàlisi de cues per aquest cas, el temps d'espera mig seria:

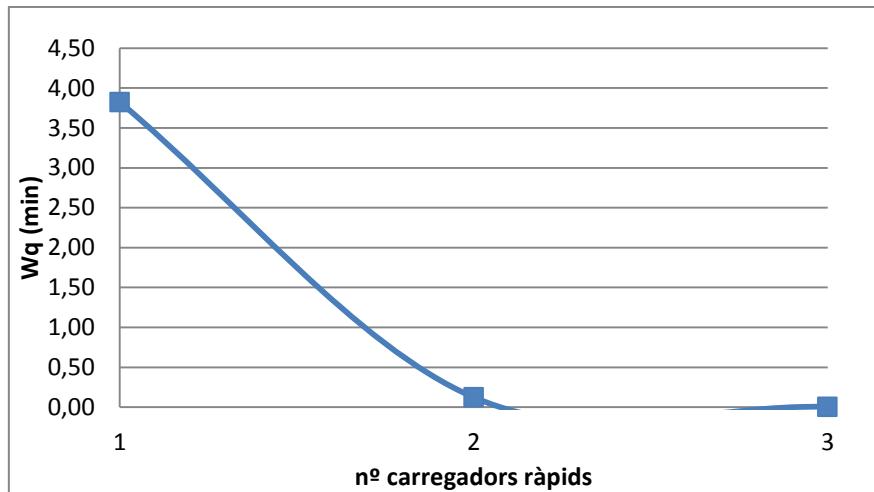


Figura 17. Temps d'espera mig degut el nombre de carregadors pels turismes en el punt de recàrrega ràpida.

Com que amb un sol punt de càrrega ràpida un VE hauria d'esperar menys de quatre minuts, es decideix instal·lar només un carregador de 50 kW prioritzant sempre la connexió als punts de recàrrega lenta. Per tant, en cas de que es necessiti el punt de recàrrega, un cop carregat el cotxe, aquest haurà d'abandonar el punt per tal de deixar-lo lliure per les possibles emergències.

3.3. Conclusions de l'anàlisi de cues

Es pot extreure que tot hi que hi haurà endolls de càrrega lenta disponibles per tots els VE, només es tindran 4 funcionant a la vegada, ja que així s'evita haver de contractar una tarifa on la potència fixe sigui molt elevada disminuint costos de la factura.

Pel que fa la càrrega ràpida, amb un sol carregador per les emergències ni ha més que suficient, ja que les poques probabilitats de fer dos viatges el mateix dia amb el mateix cotxe són tan baixes que no justificaria el sobre cost d'instal·lar-ne un segon carregador.

Per tant, es disposen de 14 carregadors lents i un carregador de càrrega ràpida. A la figura 18, queda definit l'estació de recàrrega simplificada:

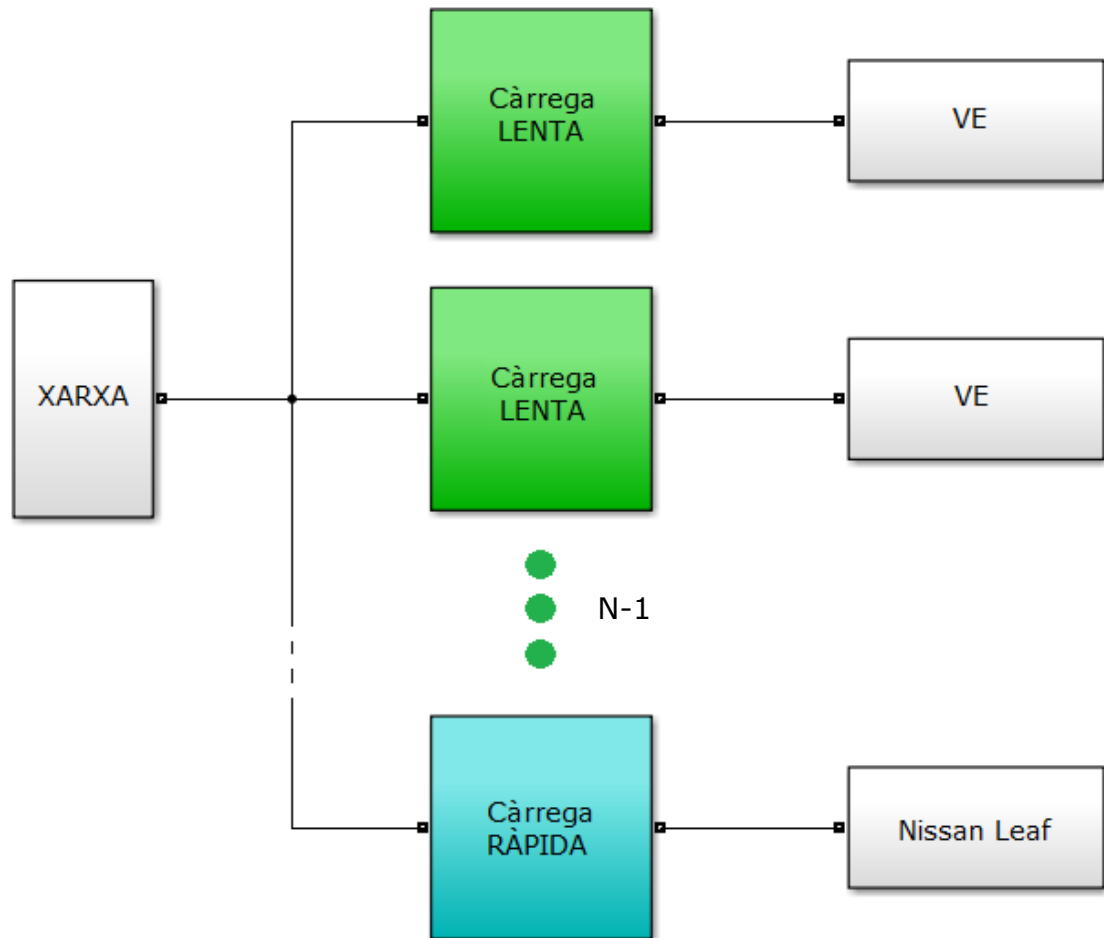


Figura 18. Esquema simplificat de l'estació de recàrrega sent $N=15$.

Un cop definits els números del dimensionament, només cal saber com es farà aquesta recàrrega, per això en el següent apartat es discutirà sobre l'optimització de la recàrrega.

Capítol 4:

Optimització de la recàrrega lenta

4.1. Introducció

En aquest capítol s'optimitza la recàrrega lenta dels VE substituïts, que són els següents:

VE escollit	Nombre de VEs	Capacitat de les bateries (kWh)
Nissan Leaf	8	24
Renault Twizy	2	6,1
Mitsubishi Outlander	4	8,4

Taula 6. VE escollits per a l'optimització de la recàrrega.

L'optimització de la recàrrega és un punt important per què el canvi d'VCI a VE sigui realment beneficiós per l'usuari. Es necessita elegir quina és la forma més rendible a nivell econòmic i mediambiental de la mateixa, ja que una mala planificació a gran escala pot produir un sobredimensionat de les infraestructures elèctriques a causa de l'augment de la demanda descontrolada d'energia en les hores pic, produint paral·lelament un augment de les emissions de gasos contaminants. Per tant, s'ha de prioritzar la recàrrega en hores vall. Actualment, moltes companyies ja ofereixen tarifes amb tres franges horàries, aprofitant les hores on la demanda global és baixa (entre la 1 a les 7 de la matinada). És en aquest moment on s'han de poder recarregar els VEs per tal d'evitar els problemes mencionats anteriorment.

En el projecte s'ha optat per una tarifa super-vall plus d'Endesa creada especialment per a la recàrrega de VE. La tarifa es troba descrita a la taula 10 definida més endavant.

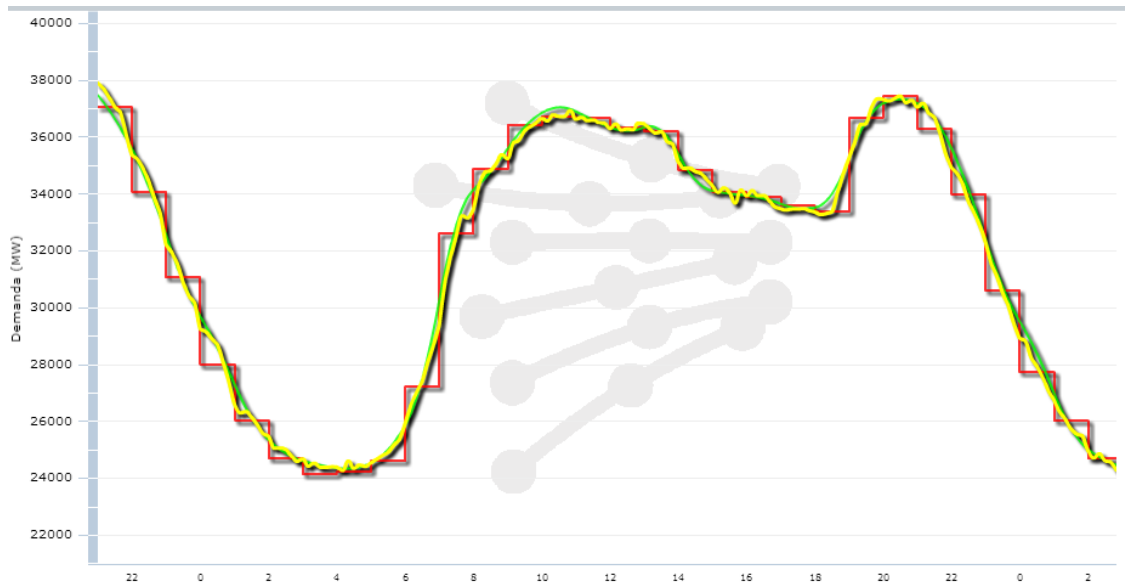


Figura 19. Corba de la demanda elèctrica del 18/02/2015 (REE).

A la figura 19 s'observa que la demanda baixa en les hores dites. A més a més, aquest fet va relacionat amb el moment del dia on la penetració d'energies renovables és més elevada a Espanya, és a dir, és el moment del dia on el kWh és més net i per tant les emissions també baixen de forma considerable.

El software a utilitzar per tal d'optimitzar aquesta nova premissa, serà el *General Algebraic Modeling System*[®] (GAMS[®]), un programa d'utilització molt senzill que permet optimitzar algoritmes molt complexos i que a mà serien molt lents de fer.

GAMS[®] disposa de molts *solvers*, en el projecte es farà servir el minlp, que permet el càlcul de variables discretes amb equacions no lineals.

En el següent apartat del capítol, es fa un esquema de l'algoritme d'optimització per tal d'entendre el funcionament i la finalitat del mateix.

4.2. Model de l'algoritme

Com ja s'ha anat dient al llarg del projecte, la intenció és estalviar diners i, de forma indirecta, emissions durant el procés de càrrega dels VEs, per tant les premisses (restriccions) d'aquest algoritme seran les següents:

- Estalvi econòmic del procés (minimitzar costos).
- Disponibilitat d'un mínim de l'estat de càrrega de les bateries al final del procés. Es definiran dos escenaris, un amb un 80% i l'altre amb el 100% i es compararan.

Amb aquestes dues premisses principals, hi ha d'haver suficient per poder arribar al l'objectiu marcat. S'ha de remarcar que només hi hauran 4

carregadors funcionant en simultaneïtat, per tant s'haurà de tenir en compte en el moment de les restriccions del algoritme.

Definició de les variables

El primer pas per definir un model ha de ser la declaració de les variables que es tindran en compte en el procés.

Per començar, es definiran les variables globals del procés que no depenen de cada VE.

L'optimització es durà a terme entre les 14 hores d'un dia laboral (T_i) fins a les 14 hores del dia següent (T_f), per tant:

$$T_f = T_i + 24 \text{ hores} \quad (12)$$

Les altres variables d'interès són:

Variable	Quantitat/unitat
Numero de PC simultanis (NPC)	4
Rendiment de les bateries (rend_{bat})	96%
SOC desitjat (SOC_{des})	pu
Variable a minimitzar/ Cost del procés (z)	€

Taula 7. Dades globals del sistema.

Pel que fa el punt de càrrega es tindran en compte les següents característiques:

Variable	Quantitat/unitat
Tensió (V_{pc})	230 V
Intensitat màxima (I_{max})	16 A
Rendiment (η_{pc})	99%

Taula 8. Característiques del punt de càrrega.

A continuació es definiran les dades que depenen directament de cada VE i . Per saber si un VE està connectat al punt de càrrega es defineix la variable cx_i de tipus binari, ja que només pot estar en dos estats. La següent taula defineix les variables més importants necessàries per tal de definir el sistema i que depenen directament de cada VE. Es descriuen les unitats de cada variable.

Variable	Quantitat/unitat
Capacitat (cap)	kWh
Temps d'arribada (t_{arr})	hores
Temps de sortida (t_{sor})	hores
SOC de arribada (SOC_{arr})	pu
SOC de sortida (SOC_{sor})	pu
Increment de SOC (ΔSOC)	pu

Taula 9. Característiques de cada vehicle elèctric.

Es tindrà en compte que el SOC mínim sempre serà superior a 0%, ja que sinó el VE s'haurà quedat sense energia. Anàlogament, el SOC màxim serà

del 100%. La hora de sortida serà aleatori entre les 7 fins les 12, mentre que el d'arribada serà acotat aleatòriament entre les 14 fins les 17.

$$t_{arr} = T_i + \text{random}\{1,4\} (14 - 17) \quad (13)$$

$$t_{sor} = T_i + \text{random}\{17,22\} (7 - 12) \quad (14)$$

Nota: El criteri ve donat a que en el capítol anterior, s'ha demostrat que la probabilitat de que un vehicle surti o entri al pàrquing de la diputació és superior al 90% ambdós casos entre els períodes marcats respectivament.

El llistat de preu de l'energia dependrà de l'hora on l'intercanvi és produeixi. S'ha agafat una tarifa super-vall que disposa de tres franges horàries de la companyia Endesa:

Nom	Preu (€/kWh)	Horari
Preu hora pic (pr_p)	0,216621	13-23
Preu vall (pr_v)	0,164617	7-13//23-1
Preu super-vall (pr_{sv})	0,068178	1-7

Taula 10. Preu de l'electricitat segons la franja horària.

Per simplificar la simulació s'han pres certes consideracions:

- No hi ha auto-descàrrega de la bateria.
- Es considera que el voltatge per a cada bateria és el mateix i que és constant durant tota la recàrrega (230V).

Equacions de l'algoritme

Amb les dades definides i les condicions descrites, es procedeix a definir les equacions del sistema:

$$cx(i, t) = \begin{cases} 1, & t_{arr} \leq t \leq t_{sor} \\ 0, & \text{si no esta dins} \end{cases} \quad (15)$$

La primera equació és la referida a la connexió del VE al punt de càrrega propi per cada t . El rang de temps va des de la hora d'arribada fins la hora de sortida del VE.

$$0 \leq I_{pc}(i, t) \leq I_{max} \quad (16)$$

Pel que fa el flux d'intensitat, és un número entre 0 i la intensitat màxima permesa pel punt de càrrega (I_{max}). És la variable que el programa utilitzarà per poder optimitzar costos, per tant no tindrà cap equació definida per tal de no donar-li un valor concret.

$$p(i, t) = I_{pc}(i, t) \cdot V_{pc} \cdot cx(i, t) \quad (17)$$

El flux de potència que pot proveir el PC per cada unitat de temps, ve donada per la clàssica equació $P=V \cdot I$ amb el producte de la connexió. Per tant, només podrà donar energia al VE si aquest esta connectat al sistema.

$$SOC_{ant}(i, t) = \begin{cases} SOC_{arr}, & t = t_{arr} \\ SOC(i, t-1), & t_{arr} < t \leq t_{sor} \\ 0, & t < t_{arr} \end{cases} \quad (18)$$

Per poder calcular la necessitat de la recàrrega del VE s'ha de conèixer prèviament el SOC en el moment just anterior a l'instant t (SOC_{ant}). Pot tenir tres valors que dependran de l'instant que ens trobem:

- Per a un t inferior al temps d'arribada del vehicle, es defineix com a 0 ja que no hi ha forma de conèixer l'estat de la mateixa.
- Quan el VE arriba al punt de càrrega, l'estat s'agafa directament de la informació que ens aporta la mateixa (SOC_{arr}).
- Durant la connexió del VE al punt, aquest serà el SOC de l'instant anterior ($SOC(i, t-1)$).

$$SOC(i, t) = SOC_{ant}(i, t) + \frac{p(i, t) \cdot rend_{bat} \cdot rend_{pc}}{Cap_i} \quad (19)$$

Fent ús de (17) i (18) junt amb el rendiment de les bateries durant el procés i el del punt de càrrega afegint-hi la capacitat del VE_i , es defineix el SOC en l'instant t del cotxe i .

$$SOC_{sor}(i, t) = SOC(i, T_{sor}) \quad (20)$$

$$\Delta SOC(i, t) = SOC(i, t) - SOC_{ant}(i, t) \quad (21)$$

Les dues últimes equacions d'interès del SOC són les de l'estat de càrrega al moment de sortida (SOC_{sor}) i la del increment del SOC per cada instant de t (ΔSOC). Són dues variables de control del sistema que es faran servir quan es defineixin les restriccions.

$$Cost(i, t) = p(i, t) \cdot pr_{ele}(t) \quad (22)$$

$$Cost_{EV}(i) = \sum_{t=T_i}^{T_f} Cost(i, t) \quad (23)$$

$$Cost_{tot} = \sum_{i=0}^N Cost_{EV}(i) \quad (24)$$

Per acabar, les equacions referides al cost de la recàrrega són les tres anteriors que defineixen el cost per cada instant de t , per cada VE i el total de totes les recàrregues, respectivament.

Com que el que es vol minimitzar és el cost de la recàrrega, la funció a optimitzar serà la del cost total, per tant la variable z estarà relacionada amb la funció de $Cost_{tot}$.

Restriccions del programa

Per poder arribar al objectiu marcat, el programa necessita que s'acotin les variables definides. Això ho fa mitjançant les restriccions. En total són 4:

$$p(i, t) \cdot rend_{bat} \cdot rend_{pc} \cdot cx(i, t) \leq (1 - SOC_{arr}) \cdot Cap(i) \quad (25)$$

Aquesta primera restricció ens defineix que el flux d'energia durant el període que el VE està connectat al PC no superi en cap cas l'energia total necessària per a la recàrrega del VE.

$$\sum_{i=0}^N I_{pc}(i, t) \leq NPC \cdot I_{max} \quad (26)$$

Per tal de garantir que no es superi el límit donat de intensitat (només es pot disposar de 4 PC en simultaneïtat) es defineix que la suma de totes les intensitats sigui menor o igual al producte de la intensitat màxima de cada punt per el numero de PC que poden funcionar a la vegada.

$$SOC_{sor} = o \geq SOC_{des} \quad (27)$$

La tercera restricció és que el SOC de sortida ha de ser igual o igual/superior al SOC desitjat quan el VE és desconnectat del punt. El símbol de la igualtat canviarà depenent de les necessitats que es sol·licitin.

$$\Delta SOC(i, t) \leq p(i, t) \cdot rend_{bat} \cdot rend_{pc} \cdot cx(i, t) \quad (28)$$

L'última de les restriccions és molt semblant a la primera només que garanteix que l'increment de l'estat de càrrega no superi mai el flux màxim de potència que pot arribar el PC en cada instant de càrrega.

Així doncs, l'esquema final de l'algoritme en blocs, pot ser el presentat a la Figura 20:

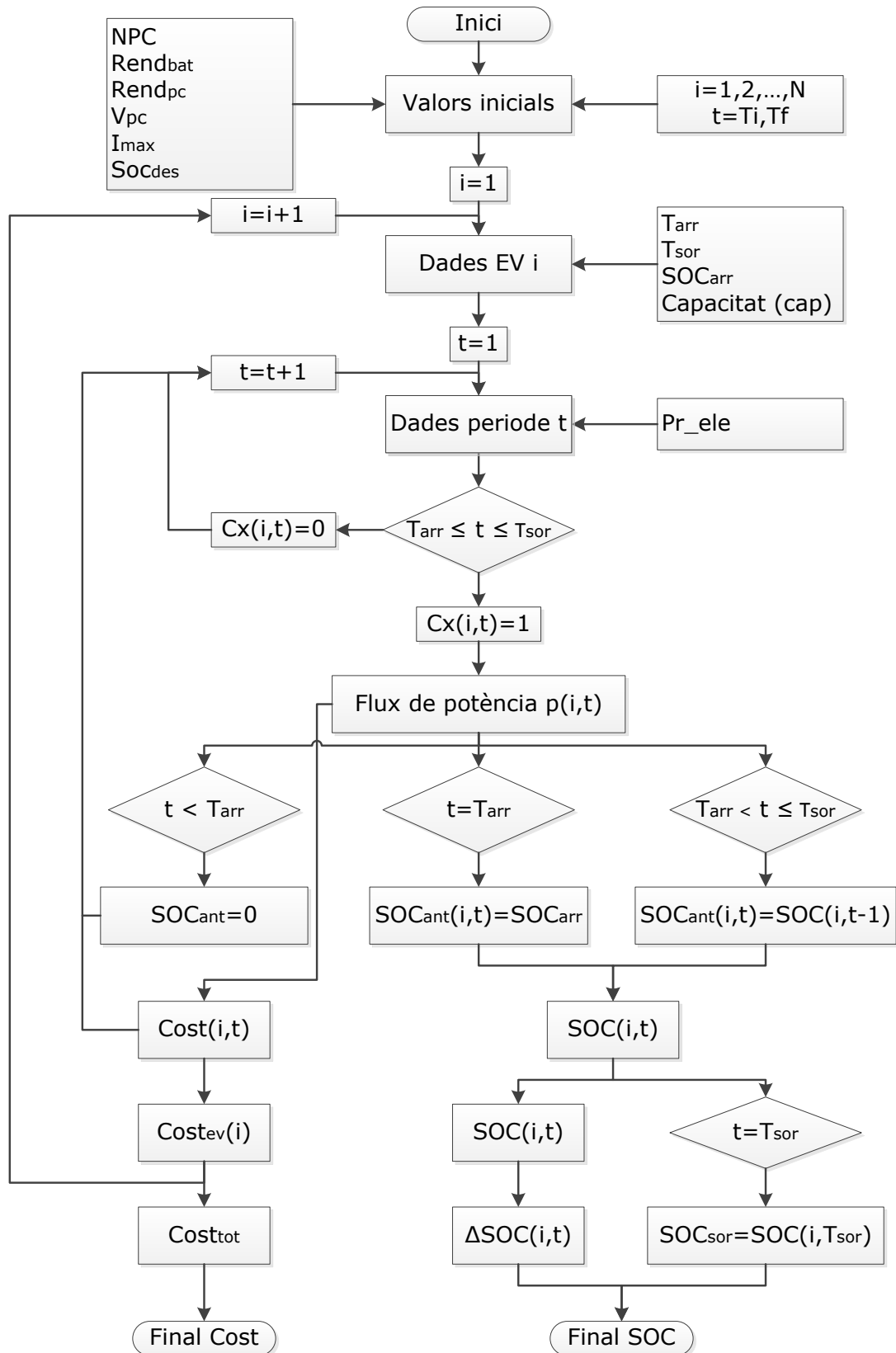


Figura 20. Esquema final de l'algoritme d'optimització.

4.3. Estructura de l'algoritme

En aquest apartat, s'inclou l'estructura de l'algoritme utilitzada en el GAMS®. Degut a que s'utilitzen diverses modificacions, només es mostrarà complet el principal: l'optimització del programa per minimitzar els costos de la recàrrega pels 14 vehicles substituïts.

4.3.1. Conjunt d'índexs del programa

```
sets
  i EV /ev1*ev14/
  j dades de càrrega /t_arr, t_sor, soc_arr, soc_des, cap/
  t temps /t1*t24/
  k dades de preu /pr_ele/;
```

L'índex i defineix el nombre de vehicles que es faran servir en el programa mentre que el j és necessari per a definir la taula amb les característiques de cada VE, controlant l'hora d'arribada i sortida, l'estat de càrrega d'arribada i el desitjat i per últim la capacitat de cada bateria.

El següent índex t defineix els diferents períodes de temps (24 hores). L'últim k es necessita per definir el preu de l'electricitat per a cada període de temps.

4.3.2. Declaració de les dades

```
table ev(i,j)
           t_arr  t_sor  soc_arr soc_des cap
ev1       1      19     0.16    1      24
ev2       3      21     0.20    0.9    24
ev3       1      20     0.09    0.8    24
ev4       4      19     0.11    0.75   24
ev5       1      22     0.20    0.69   24
ev6       2      22     0.10    0.85   24
ev7       1      20     0.20    0.91   24
ev8       3      17     0.19    1      24
ev9       3      20     0.16    0.75   6.1
ev10      2      17     0.34    0.86   6.1
ev11      1      17     0       1      8.4
ev12      1      19     0       1      8.4
ev13      3      20     0       1      8.4
ev14      1      20     0       1      8.4;
```

```

table pr(t,k)
      pr_ele
t1    0.216621
t2    0.216621
t3    0.216621
t4    0.216621
t5    0.216621
t6    0.216621
t7    0.216621
t8    0.216621
t9    0.216621
t10   0.164617
t11   0.164617
t12   0.068178
t13   0.068178
t14   0.068178
t15   0.068178
t16   0.068178
t17   0.068178
t18   0.068178
t19   0.164617
t20   0.164617
t21   0.164617
t22   0.164617
t23   0.164617
t24   0.216621;

```

La primera taula defineix les característiques de cada VE en certs instants d'interès.

Per exemple, el VE nº1, arriba a les 14 hores (1) amb un estat de càrrega del 16% i surt del recinte a les 9 hores (19) amb les bateries plenes (100%). Al ser un Nissan Leaf, les seves bateries són de 24 kWh.

En la segona taula, queda definit el preu de l'electricitat per cada període.

```

Scalar NPC Numero màxim de PC disponibles /4/
rend_PC rendiment del punt de càrrega /0.99/
rend_bat rendiment de les connexions de la bateria /0.96/
V_pc voltatge del punt de càrrega [V] /230/
I_max intensitat del punt de càrrega [A] /16/
soc_max estat de la càrrega màxim /1/
soc_min estat de la càrrega mínim /0/
pr_max preu màxim /0.216621/;

```

Les dades que no depenen de cap dimensió ja que són constants, queden definides com escalars de l'anterior manera. Les dades *soc_max*, *soc_min* i *pr_max*, són internes del programa per restringir certes variables i no tenen més interès que aquest.

4.3.3. Declaració de les variables

Variables

```

cx(i,t) connexió del EV al PC [0-1]
soc_ant(i,t) estat de càrrega anterior
I_pc(i,t) flux de corrent entre EV i PC
sumI_pc(t) suma de les intensitats
p(i,t) potència demandada pel EV
soc(i,t) estat de càrrega per cada t
ASOC(i,t) increment del SOC per cada t
soc_sor(i,t) estat de càrrega al sortir
c_ev(i) cost de recàrrega per cada EV
z variable objectiu

```

D'aquesta manera queden definides totes les variables del sistema que han estat descrites en l'apartat 4.2 anteriorment. La variable z s'utilitza per definir la funció objectiu. Com es pot observar, totes les variables menys la z , van seguides de les seves dimensions corresponents.

Com que hi ha variables que han de estar entre certs valors, el GAMS disposa de la següent comanda per acotar-les:

```

binary variables cx(i,t);

Positive variables soc(i,t), I_pc(i,t);

soc.lo(i,t)=soc_min;
soc.up(i,t)=soc_max;
I_pc.up(i,t)=I_max;

```

La variable de connexió només pot ser 0 o 1, per tant queda definida com a binària mentre que l'estat de càrrega per cada instant i la intensitat només poden ser positives i queden acotades com a tal.

Les tres últimes línies de codi, marquen els límits màxim (.up) i mínim (.lo) de l'estat de càrrega i el màxim del flux de càrrega.

4.3.4. Definició i declaració de les equacions i restriccions

Equations

```

conexio(i,t) indica la connexio del EV al PC
SOC1(i,t) estat de càrrega de t-1
suma_intensitats(t) definició de sumI_pc
potencia(i,t) definició de la variable p
SOC2(i,t) estat de càrrega de t
increment_SOC(i,t) definició ASOC
soc_sortida(i,t) SOC en que el EV acaba la recàrrega
cost_EV(i) definició de la variable c_ev
funciobj funció objectiu

** Restriccions
lim_car(i,t) límit de càrrega per cada EV en cada t
lim_car_tot(t) límit de càrrega total per cada t
garantia_carga(i,t) La càrrega serà màxima al final
garantia_ASOC(i,t) L'increment del SOC queda restringit;

```


Un cop declarades les variables, es procedeix amb les equacions. Un cop definides, es declaren:

```
conexio(i,t) ..cx(i,t)=e=(1)$ (ord(t) ge ev(i,'t_arr') and ord(t) le ev(i,'t_sor') and pr(t,'pr_ele') lt pr_max);

SOC1(i,t) ..soc_ant(i,t)=e=(0)$ (ord(t)lt ev(i,'t_arr'))+(ev(i,'soc_arr'))$(ord(t)eq ev(i,'t_arr'))+(soc(i,t-1))
$(ord(t)gt ev(i,'t_arr') and ord(t) le ev(i,'t_sor'));

suma_intensitats(t) ..sumI_pc(t)=e=sum(i,I_pc(i,t));

potencia(i,t) ..p(i,t)=e=I_pc(i,t)*V_pc*cx(i,t)/1000;

SOC2(i,t) ..soc(i,t)=e=soc_ant(i,t)+cx(i,t)*I_pc(i,t)*rend_bat*rend_pc*V_pc/(1000*ev(i,'cap'));

soc_sortida(i,t)$ (ord(t) eq ev(i,'t_sor')) ..soc_sor(i,t)=e= soc(i,t);

increment_SOC(i,t) ..ASOC(i,t)=e=soc(i,t)-soc_ant(i,t);

cost_EV(i) ..c_ev(i)=e=sum(t,pr(t,'pr_ele')*p(i,t));

funciobj ..z=e=sum(i,c_ev(i));
```

Amb les corresponents restriccions:

```
** Restriccions del sistema

lim_car(i,t)$ (ord(t) ge ev(i,'t_arr') and ord(t) lt ev(i,'t_sor'))
..I_pc(i,t)*V_pc*cx(i,t)*rend_bat*rend_pc=l=(1-ev(i,'soc_arr'))*1000*ev(i,'cap');

lim_car_tot(t) ..sum(i,I_pc(i,t))=l=NPC*I_max;

garantia_carga(i,t)$ (ord(t) eq ev(i,'t_sor')) ..soc_sor(i,t)=e=ev(i,'soc_des');

garantia_ASOC(i,t) ..ASOC(i,t)=l=I_pc(i,t)*V_pc*cx(i,t)*rend_bat*rend_pc;
```

Segueixen l'ordre definit en l'apartat anterior 4.2.

4.3.5. Model i solver

Un cop definides totes les dades, equacions i les restriccions del sistema a optimitzar, es nombre el model i just darrera queden marcades les restriccions que s'hi apliquen.

```
Model Optimitzacio_recarrega /all/;

Solve Optimitzacio_recarrega using minlp minimizing z;
```

Com que el model utilitza totes les restriccions s'afegeix el /all/. Pel que fa el *solver*, al tenir equacions no lineals, s'utilitza el minlp indicant que minimitzi l'equació z.

4.3.6. Modificacions del programa pels altres escenaris

Sense controlar

Com en aquest escenari no ens interessa l'estalvi econòmic i es prioritza l'estat de càrrega per a cada VE, la funció a optimitzar passa a ser maximitzada i es converteix en:

```
funciobj ..z=e=sum((i,t),soc(i,t));
```

I la columna de soc desitjat, es converteix en tots 1.

Estalvi econòmic potencial

Com en aquest nou escenari el que es vol comprovar és l'estalvi en un cas concret, els VEs a tenir en compte són només 8 amb un soc d'arribada del 5,3% i l'estat de carrega desitjat també passa a ser 1.

```
table ev(i,j)
      t_arr  t_sor  soc_arr soc_des cap
ev1    1    19    0.053   1    24
ev2    3    21    0.053   1    24
ev3    1    20    0.053   1    24
ev4    4    19    0.053   1    24
ev5    1    22    0.053   1    24
ev6    2    22    0.053   1    24
ev7    1    20    0.053   1    24
ev8    3    17    0.053   1    24;
```

La funció objectiu torna a ser la del escenari principal, minimitzar els costos.

4.4. Resultats de l'optimització

4.4.1. Escenaris del 80% i del 100% del SOC al final de la recàrrega diària

80% de SOC

- Cost total de la recàrrega: **17,29€.**

Aquest baix preu és tan reduït gracies a que la recàrrega sempre es produirà en hores on la tarifa sigui la més baixa possible. Si s'observa el flux d'intensitat es pot veure que això succeeix entre les 23 fins a les 10 es quan hi ha més flux d'energia, deixant lliures les hores on és més cara.

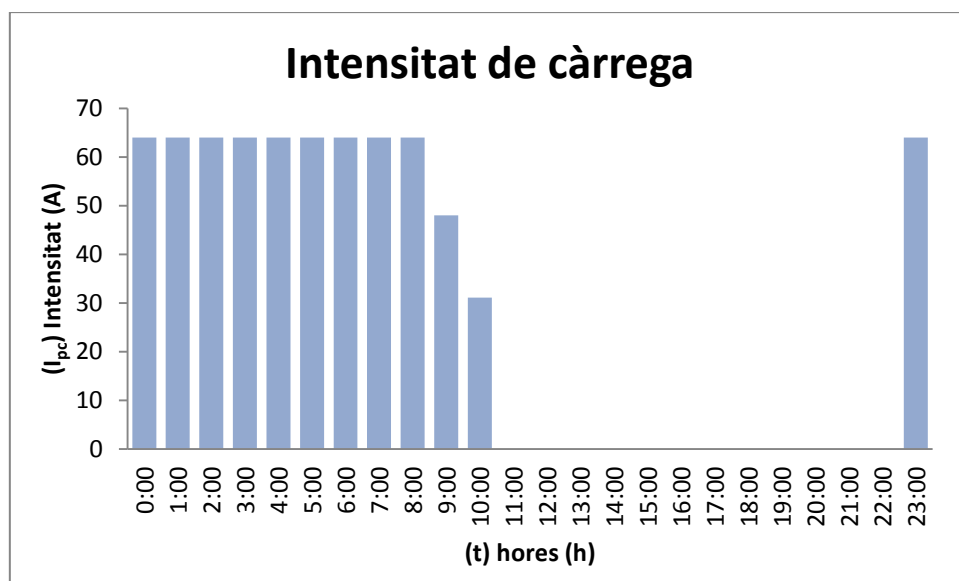


Figura 21. Intensitat durant la recàrrega pel 80% del SOC.

A la figura 21 es pot observar que degut a minimització de costos, el PC primer omple les bateries a les hores on el preu és més baix (1-7) i després

es connecta a les hores en tarifa vall. En cap cas es necessari connectar cap VE en hora pic i per tant el preu se'n beneficia i es redueix substancialment.

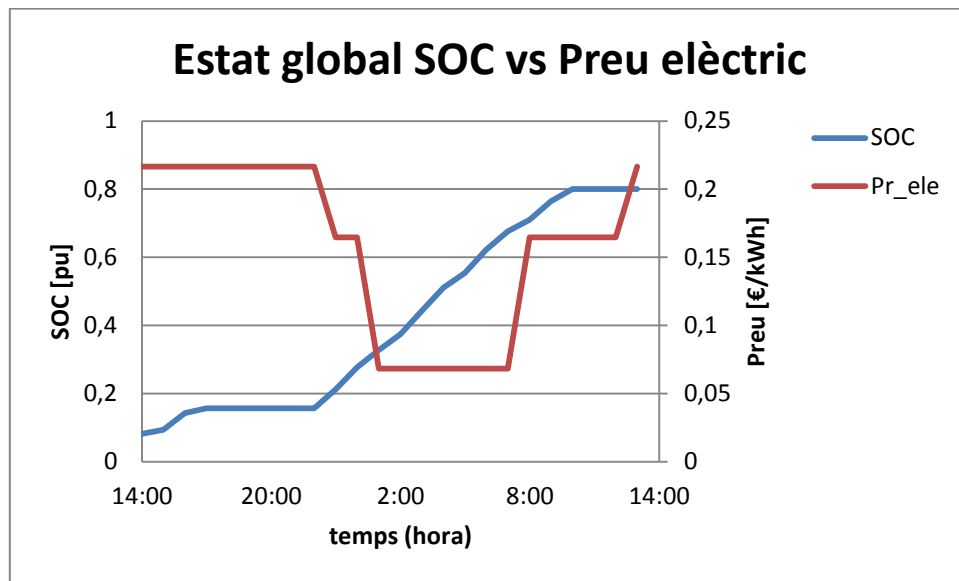


Figura 22. Comparació entre el estat global del SOC fins el 80 % amb l'evolució del preu de la electricitat.

A la figura 22 es pot observar el que s'ha descrit en el paràgraf anterior, a les hores de matinada on el preu de l'electricitat és més baix, s'aprofita per recarregar els VE fins el SOC final desitjat.

100% del SOC

- Cost total de la recàrrega: **28,12€.**

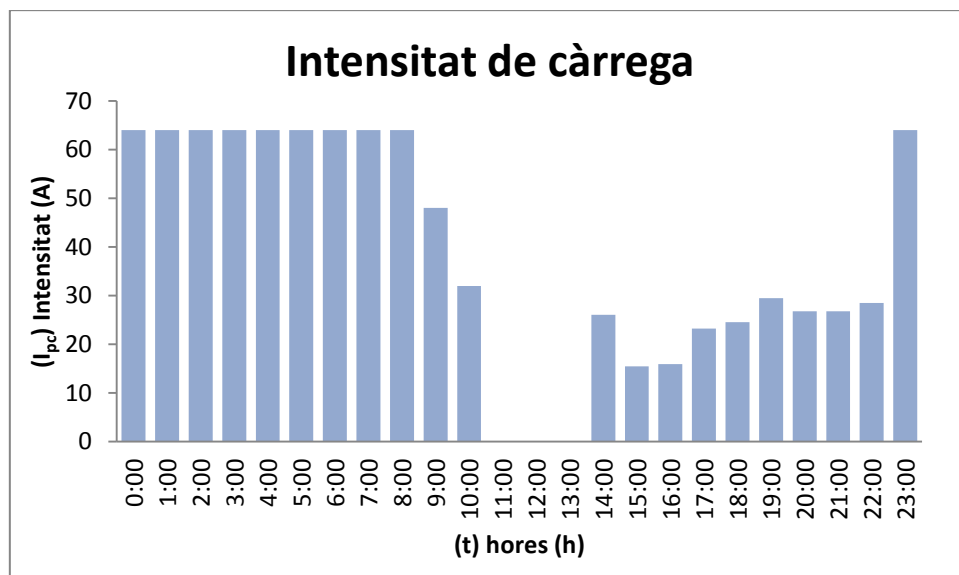


Figura 23. Intensitat durant la recàrrega pel 100% del SOC.

Degut a que s'han de fer servir hores fora del horari super-vall i vall, que el cost de la recàrrega puja d'una forma substancial ja que ha de carregar-se en hores on l'energia és més cara, com s'observa a la figura 23. Durant

aquestes hores, l'optimització sempre tendeix a intentar connectar els VEs d'una forma més homogènia depenent de l'ordre d'arribada. A partir de $t=20$, on la tarifa és de tipus vall, no s'aprofita més degut a que la gran majoria de VE ja han marxat a fer els seus corresponents serveis.

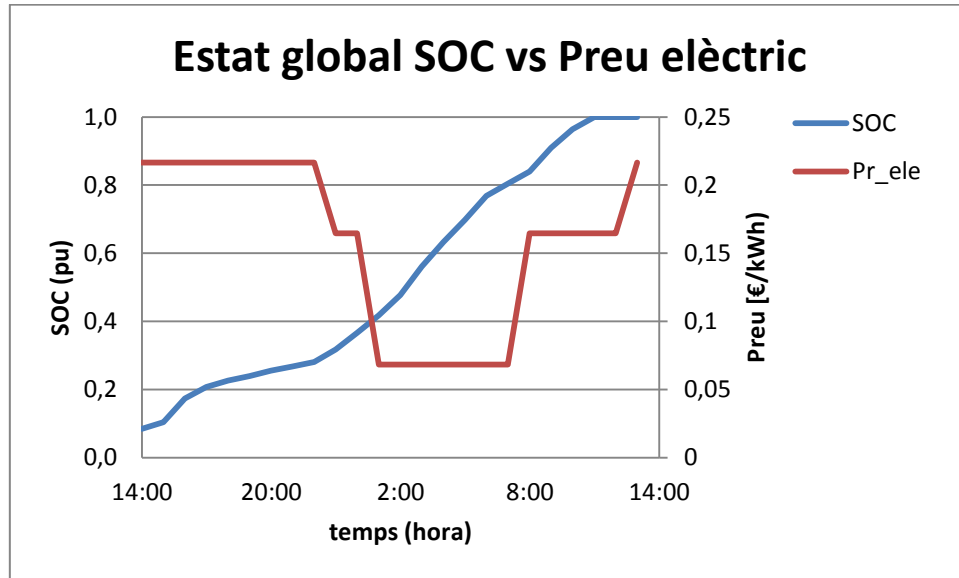


Figura 24. Comparació entre el estat global del SOC fins el 100 % amb l'evolució del preu de la electricitat.

A la figura 24 es veu que per recarregar les bateries al màxim, s'ha de comprar l'energia durant les hores pic, ja que no hi ha suficient capacitat en les altres hores per poder fer front a la demanda.

4.4.2. Escenari sense controlar

Amb la finalitat de poder avaluar l'estalvi del escenari del 100% de càrrega, s'ha optat per crear un nou escenari amb les mateixes variables que maximitzi el SOC sense tenir en compte el preu de l'energia per cada moment. Encara que fent servir aquesta estratègia no té cap sentit contractar una tarifa de tres franges, es farà servir la mateixa com a referència.

L'única equació que canvia en l'algoritme és la relativa a la funció a optimitzar de la variable z :

$$z = \sum_{i=0}^N \sum_{t=T_i}^{T_f} SOC(i, t) \quad (29)$$

Resultats

Amb la modificació establerta en l'algoritme, s'obté:

- Cost total de la recàrrega: **37,19 €.**

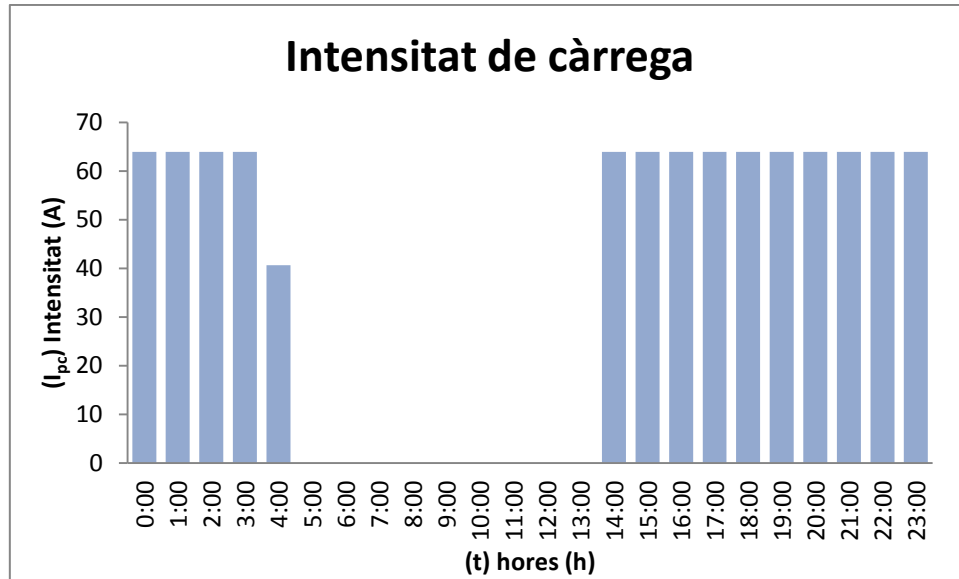


Figura 25. Intensitat durant la recàrrega pel 100% del SOC sense control tarifari.

Al no imposar cap restricció en el moment de recàrrega priorititzant en tot moment l'estat de la bateria, a la figura 25 s'observa que l'optimització deixa connectar-se els VEs just quan arriben al PC sempre que no hi hagi més de 4 connectats. Si això succeeix, el VE s'ha d'esperar a que es finalitzi la recàrrega anterior per connectar-se. A la gràfica s'observa que només s'aprofiten 4 hores de l'horari més propici, per tant, una tarifa plana amb un preu de l'energia constant podria ser més beneficiós per aquest tipus de recàrrega tot hi que no s'estalviarien emissions, sinó que augmentarien.

4.5. Estalvi econòmic potencial

Agafant l'escenari més conservador on es pugui garantir el màxim de SOC pels VEs, és procedeix a fer una comparació amb les dades obtingudes per l'optimització com si fos un dia normal.

Com a referència, es calcula els quilòmetres que realitzaria l'VE en relació del SOC en arribar al punt de càrrega:

$$dist = \frac{E_{rec}}{Consum} \quad (30)$$

On:

E_{rec} → És la energia necessària que s'ha de recarregar en el VE.

$Consum$ → El consum mig del VE en qüestió.

Tenint en compte que el preu del carburant és fluctuant i que pels Twizys s'ha suposat que el trajecte es realitzaria amb un cotxe de gasolina:

Tipus carburant	€/l
Dièsel	1,22
Gasolina	1,33

Taula 11. Preus dels combustibles (dièsel bàsic i gasolina 95) (12-03-2015).

Tipus de cotxe	Nº VE	Distància recorreguda (km)
Nissan Leaf	Ev1	95,404
	Ev2	90,861
	Ev3	103,355
	Ev4	101,083
	Ev5	90,861
	Ev6	102,219
	Ev7	90,861
Renault Twizy	Ev8	91,997
	Ev9	55,395
Mitsubishi Outlander	Ev10	43,524
	Ev11	32,18
	Ev12	32,18
	Ev13	32,18
	Ev14	32,18

Taula 12. Distància recorreguda per cada VE durant el dia anterior a la connexió.

En el cas dels Outlander, la distància recorreguda és la totalitat de l'autonomia que disposen les seves bateries, ja que fan recorreguts més llargs i només utilitzen el motor elèctric al entrar a les zones metropolitanes.

Amb les dades anteriors, es pot calcular el cost total del dia pel que fa el combustible:

$$Cost_{tot} = \sum_{i=0}^N pr_{carb} \cdot dist \cdot consum = 92,16 \text{ €}$$

On N és el número màxim de vehicles.

Tenint en compte l'escenari on les bateries es carreguen al 100% (28,12 €) s'estalviaria:

$$Estalvi = 64,04 \text{ €}$$

Aquest estalvi és només referent pel dia simulat, però es pot donar una idea d'on podria arribar si es fes d'una forma constant.

Exemple d'estalvi anual

Si s'agafa la mitjana de la distància recorreguda pels VCI que serien substituïts per Nissans Leaf (112,274 km/servei) es dedueix que els VE

arribarien amb un 5,3% del SOC al punt de càrrega i optimitzant la recàrrega s'obtindria un cost d'uns 22,13 €, per tant, l'estalvi del dia, tenint en compte que els VCI costen 82,51 € al dia en carburant, seria:

$$\text{Estalvi} = 60,38 \text{ €}$$

Com es substituiran 8 VCI, s'aconseguiria estalviar uns 7,55 € per servei. De forma proporcional, sabent que l'any passat es van fer 1030 serveis de entre 50 i 150 km, l'estalvi anual seria:

$$\text{Estalvi}_{\text{anual}} = 7,55 \cdot 1030 = 7.773,93 \text{ €}$$

Aquest preu s'ha de considerar com a referencia del que s'estalviaria en combustible, ja que no es té en compte l'adquisició dels VE, costos com el lloguer de bateria ni la potència contractada o el menor manteniment que suposen aquest tipus de vehicles.

4.6. Conclusions de l'optimització

Es pot concloure que gràcies a una correcta gestió de la recàrrega es pot estalviar molts diners, ja que les tarifes elèctriques són suficientment flexibles per adaptar-se a les necessitats d'aquests VEs. Es pot observar que si es vols disposar de el complet de les bateries, s'ha de pagar un sobre-cost d'uns 11€, és a dir, més d'un 63% més si es compara amb una recàrrega al 80% del SOC. Per tant, s'ha de decidir si els vehicles poden sobreviure amb el 80% o realment necessiten ser carregats al complet amb els sobre-cost implicat.

Per tal de comparar i donar a entendre que una correcta gestió de la recàrrega és important en el sistema, si no és controlat s'ha d'assumir un sobre-cost del 25% en l'escenari del 100% del SOC. Per tant, ja des de un punt de vista econòmic, una correcta implementació de l'algoritme de gestió de recàrrega és de vital importància en el món dels VEs.

Per acabar, si es comparen els preus per quilòmetre entre els VCI amb els VEs, la diferència és més d'un 400% més barat a favor del VE. És un bon motiu per començar a estudiar la substitució dels vehicles per l'estalvi econòmic i mediambiental a mitjà i llarg termini.

Capítol 5:

Disseny del control d'un punt de recàrrega ràpida

5.1. Introducció

En el present capítol, es dissenya el control del convertidor que forma part del punt de recàrrega ràpida.

Tot i que en el dimensionament si que s'ha tingut en compte la construcció d'un punt de recàrrega ràpida per les possibles emergències, aquest no ha sigut inclòs en l'optimització degut a que el seu concepte no és tant sobre l'estalvi econòmic sinó està molt més enfocat en una recuperació prompte de la autonomia del VE. Pot estar dirigida tant a allargar les duracions dels viatges *range anxiety* com per la necessitat de tornar a fer un viatge després d'una pausa relativament curta.

Amb els VE actuals de gama mitja com el Leaf, amb unes bateries d'uns 24 kWh de capacitat, es necessita gairebé 30 minuts per carregar-les si es disposa d'un carregador d'uns 50 kW. Aquesta afirmació no és tant certa, ja que per qüestions d'estabilitat en les reaccions químiques de les bateries, els sistemes de gestió de les bateries (BMS) limiten aquestes recàrregues a només el 80% de la càrrega d'una forma ràpida. Per tant, en una recàrrega, es poden diferenciar dos modes de càrrega:

- 0-80% del SOC: El procés tendeix a mantenir una corrent constant (CC) i garantint la màxima inserció de potència. (Ràpida)
- 80-100% del SOC: Després d'una transició, l'algoritme de càrrega prioritza el voltatge constant (VC) disminuint paulatinament la potència. (Lenta)

Cal destacar que una bateria mai deixarà arribar el SOC per sota d'una certa quantitat d'energia, ja que si es deixar descarregar-la del tot, es trigaria unes hores a arribar a un voltatge per cel·la (típicament 2,5V en les de Ió-Liti) per poder aplicar el mode CC. Per tant, quan es refereix com 0% del SOC, realment seria un 5-10% del mateix.

Afegir que la durada del segon mode VC, sol ser superior al del mode CC, ja que el BMS va limitant el corrent fixant una tensió màxima de càrrega per cel·la (uns 4,2V en les de Ió-Liti).

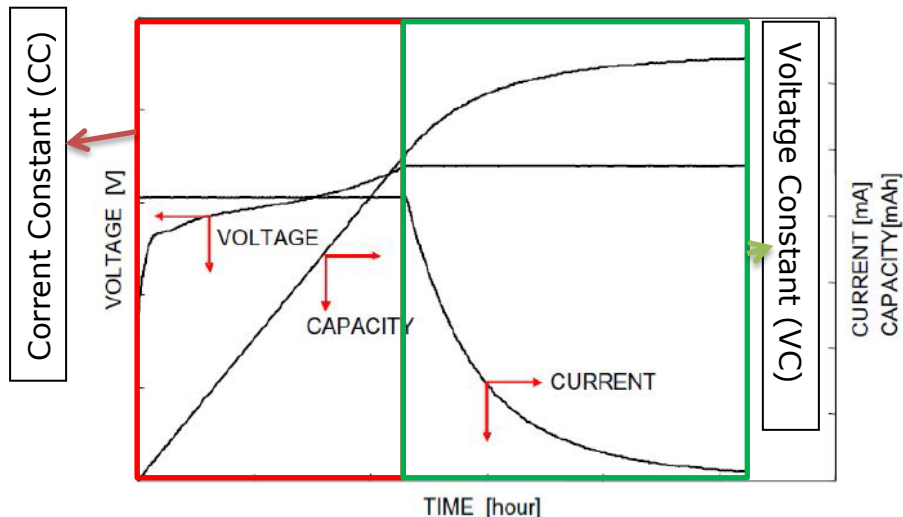


Figura 26. Exemple dels dos modes de càrrega (Kuperman, A., Levy, U., Goren, J., Zafranski, A., Savernin, A., and Peled, I. Novembre 2010).

En la figura 26, és el cas ideal, però tant al connectar-se/desconnectar-se com en el canvi de mode, es pateixen uns transitoris ens els circuits elèctrics dels carregadors. És per aquest motiu, que en el projecte, es durà a terme un estudi dinàmic dels transitoris amb la intenció de dissenyar uns controls per tal de poder absorbir-los. La simulació es dur a terme amb Matlab/Simulink®, on el punt càrrega ràpida és de 50 kW de potència connectat a una xarxa elèctrica de 400 V d'amplitud.

Només es simula el mode en CC, ja que és com treballen aquests tipus de carregadors. Cal destacar que el convertidor és bidireccional i per tant accepta la opció de *vehicle to grid* (V2G) i la bateria podria ser utilitzada com un acumulador convencional.

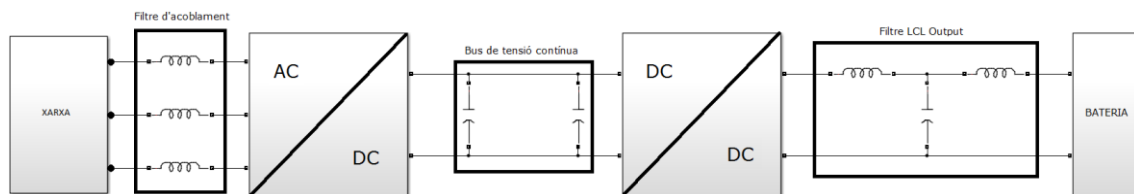


Figura 27. Esquema simplificat d'un punt de càrrega.

5.1.1. Introducció als convertidors

Un convertidor electrònic de potència o convertidor estàtic, consisteix en un circuit d'intercanvi de potència amb els seus corresponents sistemes de control i protecció. La seva construcció es pot realitzar mitjançant diverses configuracions d'interruptors i components passius. L'objectiu és facilitar l'intercanvi d'energia entre diversos subsistemes que poden tenir diferents característiques de tensió, corrent, freqüència, angle de fase o número de fases (Ulldemolins, LL., juny 2014, 31-32).

La seva implementació comença a finals del segle XX on l'ús d'aquests convertidors han anat adquirint molta importància en tota mena de circuits elèctrics. El seu gran desenvolupament es pot entendre pels seus avantatges com ara:

- El desenvolupament de semiconductors capaços de funcionar en aplicacions de gran potència.
- El processament de senyal i les estratègies de control han pogut millorar gràcies al progrés en microelectrònica.
- Les noves necessitats de la xarxa elèctrica: qualitat de subministrament i gestió de la demanda.
- Integració de l'energia renovable a la xarxa elèctrica.

Classificació

La classificació més emprada segons els subsistemes elèctrics que enllacen és: corrent altern (AC) o corrent continu (DC), així doncs s'agrupen de la següent manera:

- AC/AC: Enllaça dos subsistemes AC.
- AC/DC: L'enllaç entre un subsistema AC amb un DC.
- DC/DC: Enllaça dos subsistemes DC.
- DC/AC: Enllaç entre un subsistema DC amb un AC.

En instal·lacions solars o en els carregadors ràpids, on la tensió ha de ser controlada, la construcció típica és connectar un primer DC/DC al panell solar o a la bateria i posteriorment, un segon convertidor DC/AC connectat a xarxa. En el cas dels carregadors, poden ser de dos tipus:

- Unidireccionals: El convertidor AC/DC el formen díodes i només pot anar de la xarxa a la bateria.
- Bidireccionals: El convertidor AC/DC el formen transistors que són capaços de intercanviar el flux d'energia tant de la xarxa al vehicle com del vehicle a la xarxa (V2G).

En el cas dels convertidors DC/AC es poden classificar com:

- Convertidor de font de tensió o *Voltage-Sourced Converter* (VSC): El convertidor manté la polaritat de la tensió en el bus de contínua. La direcció del flux de potència a través del convertidor es determina segons la polaritat del corrent del bus. Per poder assimilar la tensió es connecta un condensador en paral·lel als terminals DC del convertidor que es pot assimilar com una font tensió.
- Convertidor de font de corrent o *Current-Sourced Converter* (CSC): Aquesta tipologia de convertidor, manté la polaritat del corrent en el bus de contínua. En aquest cas, el flux de potència ve determinat per la polaritat de la tensió en el bus. En el costat DC es connecta una

inductància que manté el corrent, es pot assimilar a una font de corrent.

En aquest projecte es tracten els VSC, que a més a més poden ser classificats segons la seva funcionalitat:

- Sistema VSC de freqüència imposada per la xarxa o *Grid-Imposed Frequency VSC System*: El convertidor, connectat a una xarxa de potència infinita com pot ser la xarxa elèctrica convencional, manté la tensió imposada per la xarxa.
- Sistema VSC de freqüència controlada o *Controlled-Frequency VSC System*): Contràriament als anteriors, el convertidor és qui controla la freqüència de la xarxa AC.
- Sistema VSC de freqüència variable o *Variable-Frequency VSC System*: Són convertidor connectats a una màquina elèctrica on la freqüència de treball és variable segons el punt de treball de sistema.

En el cas del treball, només s'utilitza un convertidor VSC connectat a la xarxa elèctrica i per tant, la freqüència ve imposada per la xarxa AC.

Model simplificat del carregador ràpid

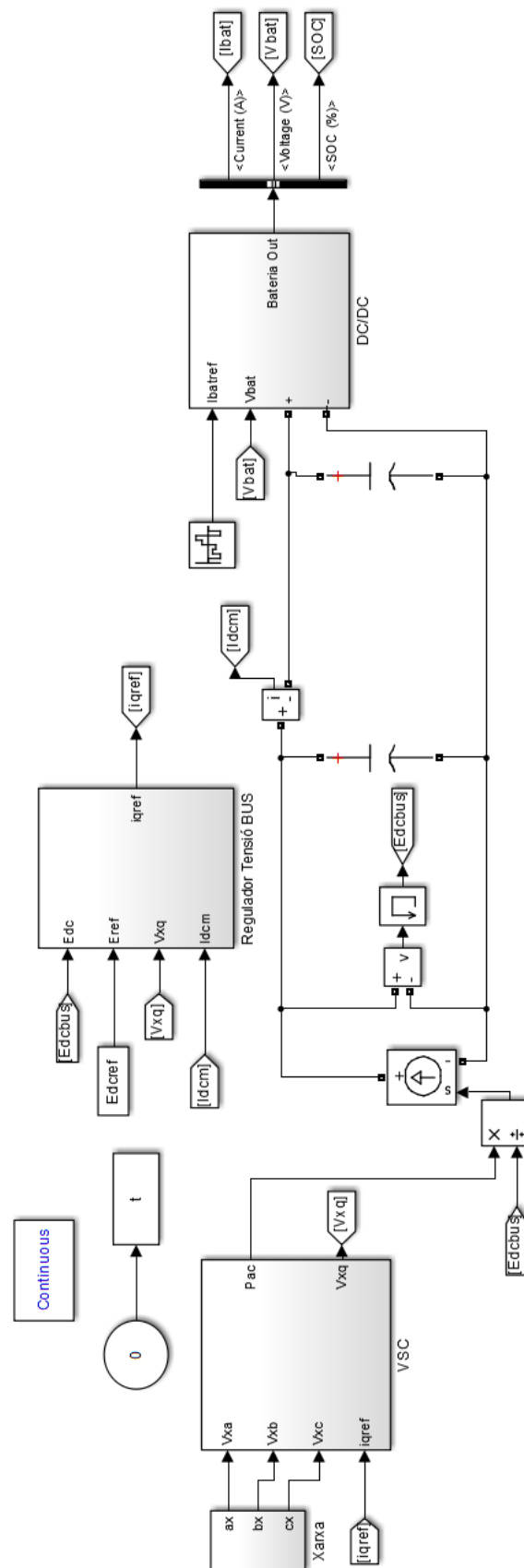


Figura 28. Model simplificat del carregador ràpid complet.

A la figura 28 es pot observar el model amb Simulink® complert del carregador ràpid. En els apartats següents, s'explica punt per punt cada element que el compona.

5.2. Xarxa

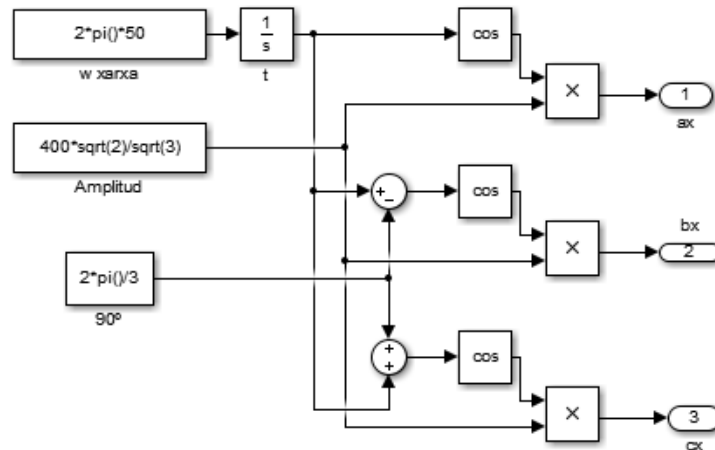


Figura 29. Esquema Simulink® de la xarxa trifàsica ideal.

A la figura 29, es simula una xarxa ideal amb de 400 V de tensió de línia. La freqüència de la xarxa (f) és idealment 50 Hz ja que el nostre cas es situa a Europa. Les equacions de xarxa són les següents:

$$\begin{bmatrix} V_a = A \cdot \cos(\omega t) \\ V_b = A \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = A \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (31)$$

El bloc integrador és l'equivalent al temps (t) on:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (32)$$

5.2.1. Transformada de Park

La transformada de Park permet transformar les senyals trifàsiques en tres senyals constants qd0. Si la transformada es fa rotar a la freqüència de la xarxa, s'obtenen tres senyals constants. A més a més, com que el sistema del projecte és de tres fils, la tercera component es 0.

Les equacions per a definir la transformada són les següents:

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (33)$$

On la seva inversa és:

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Essent la transformada d'un vector x^{abc} a la referència x^{qd0} serà:

$$[x^{qd0}] = [T(\theta)] \cdot [x^{abc}] \quad (35)$$

Anàlogament la seva inversa serà:

$$[x^{abc}] = [T^{-1}(\theta)] \cdot [x^{qd0}] \quad (36)$$

Per tant, l'esquema queda definit a la figura 30:

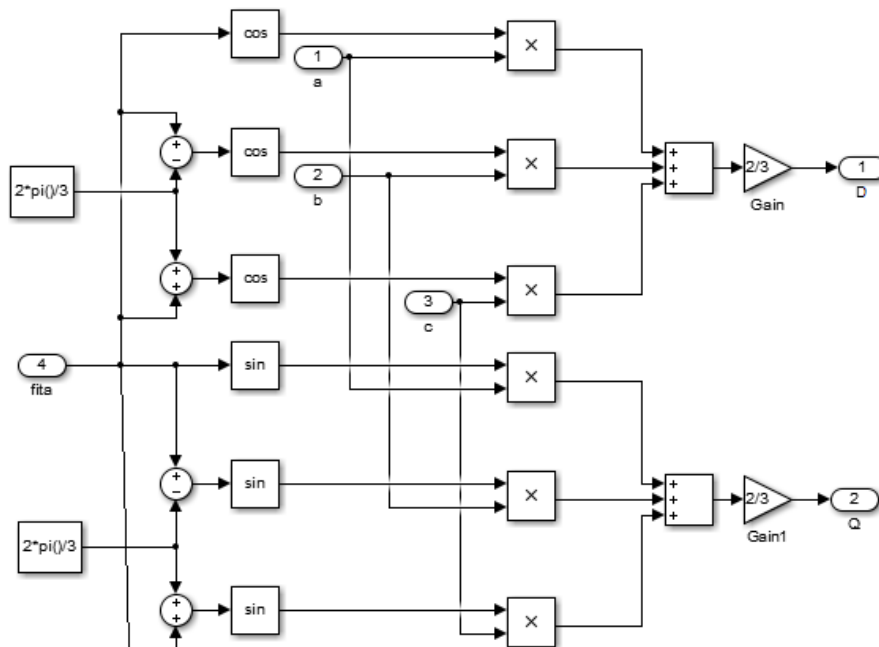


Figura 30. Esquema Simulink® de la transformada de Park.

Comprovació de la transformada de Park

Si apliquem la transformada de Park a les tensions de la xarxa anteriorment definida, s'obté:

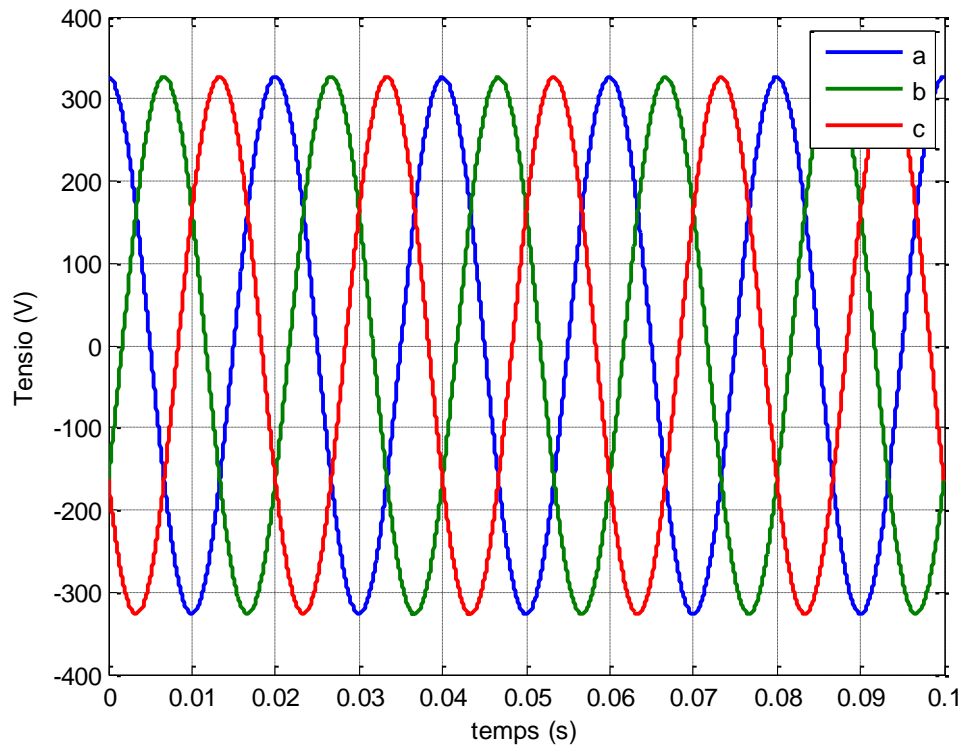


Figura 31. Tensió trifàsica de xarxa de 400 V de tensió de línia.

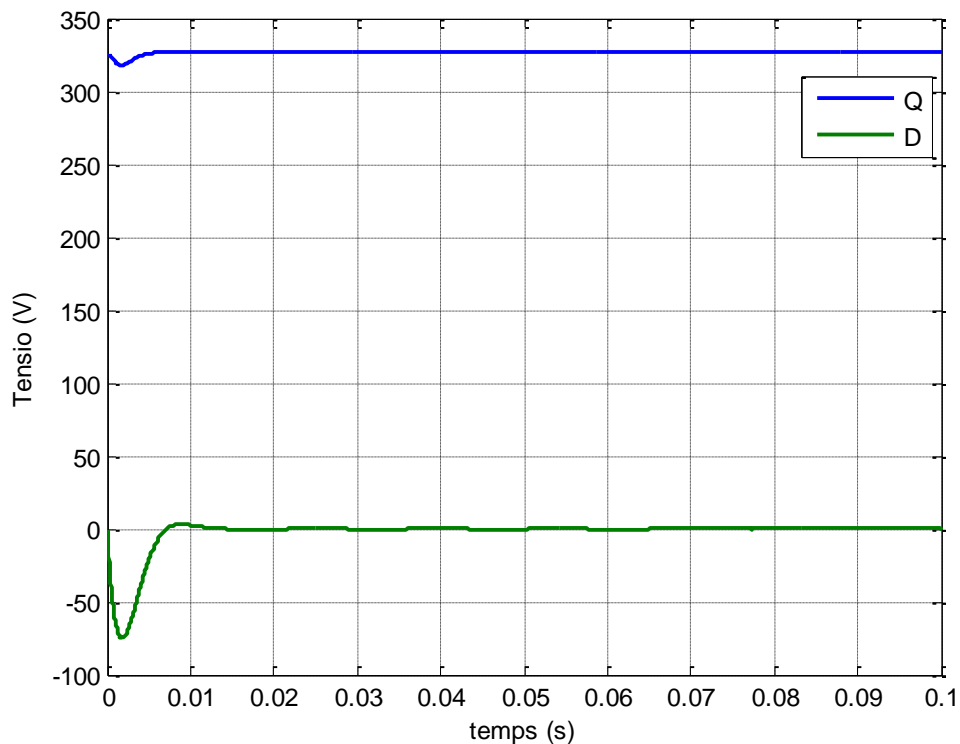


Figura 32. Tensions en QD.

A la figura 31 s'observa la senyal trifàsica de les tensions de la xarxa ideal. Un cop s'aplica la transformada de Park, considerant l'angle de la transformació com l'angle de la fase *a* s'obté les dues components transformades.

A la figura 32, la component Q amb un valor de 326,6 V coincidint amb el valor de pic de la senyal trifàsica de la tensió de xarxa. La component D, després del transitori es queda estabilitzada a 0 V ja que en el control s'ha imposat que aquest sigui el seu valor.

5.3. Convertidor AC/DC costat xarxa

5.3.1. Model simplificat del convertidor AC/DC

El convertidor VSC costat xarxa permet convertir l'energia provinent de la xarxa cap el bus de continua essent bidireccional. Tot i que realment el convertidor aplica estats de tensió discrets aplicades amb tècniques *Pulse-Width Modulation* (PWM), per tal de poder avançar el disseny amb més celeritat, es pot aproximar en un model simplificat com s'observa a la figura 33.

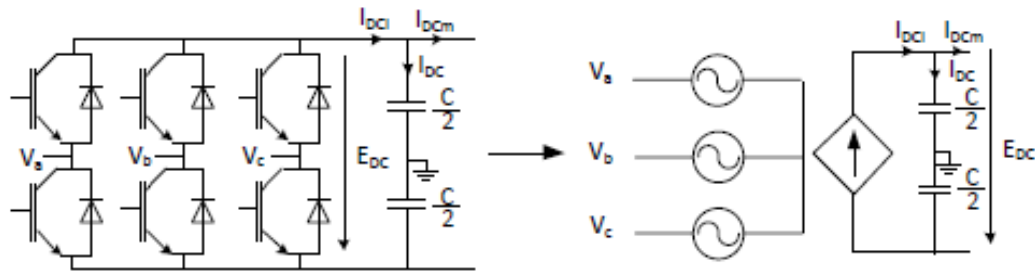


Figura 33. Esquemes del rectificador amb IGBTs i amb el model simplificat
(Egea-Alvarez, A., Junyent-Ferré, A., and Gomis-Bellmunt, O., 2012, 12).

A continuació, a la figura 34, es presenta el model simplificat amb Simulink®. Aquest model conté els següents blocs:

- Xarxa
- Transformada de Park per a les corrents i tensions
- Control de la PLL d'on s'obté l'angle i la velocitat de la xarxa.
- Diferents controls del llaç de corrent i del regulador de tensió del bus de contínua del costat del convertidor.

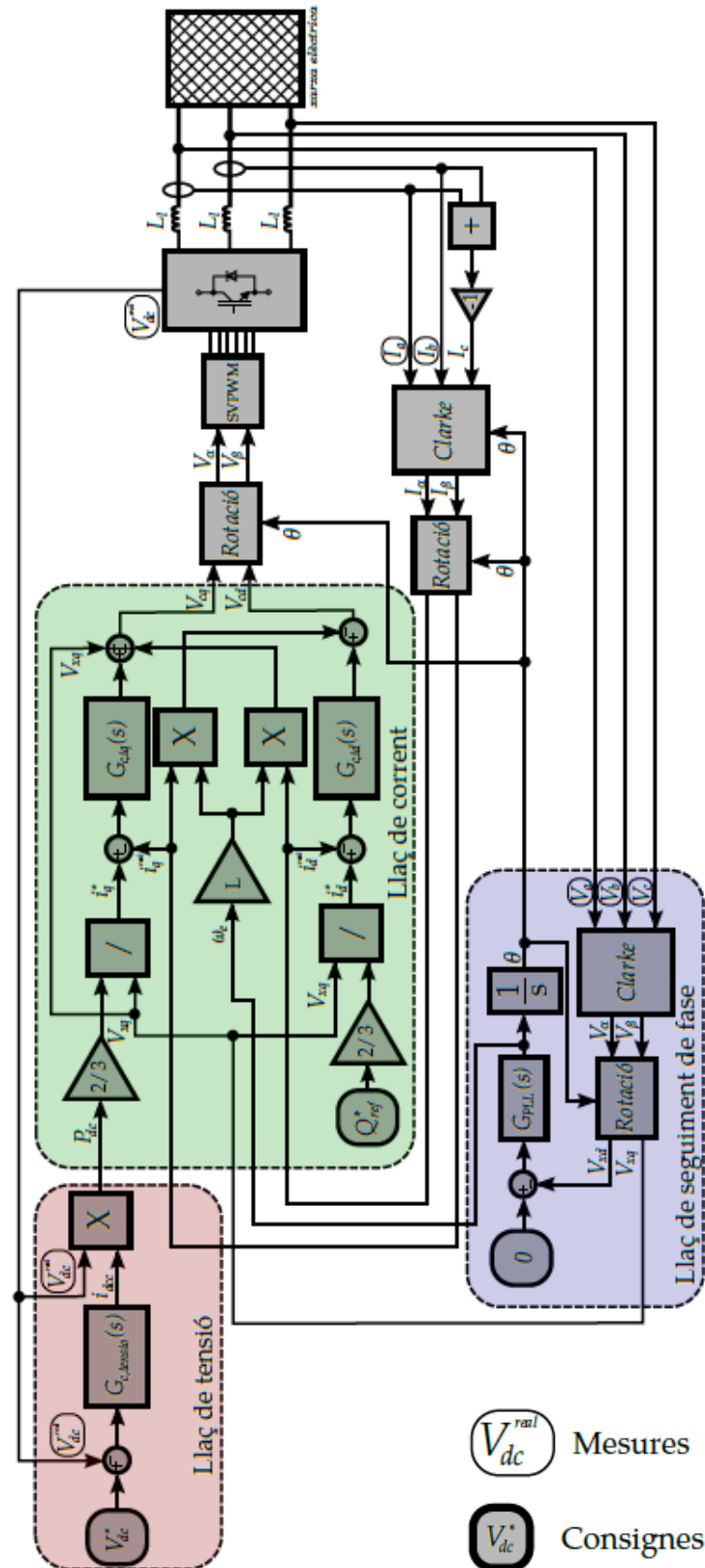


Figura 34. Esquema del model simplificat del convertidor AC/DC amb els diferents controls, transformades i modulació per SVPWM (Ulldemolins, LL., juny 2014, 48).

5.3.2. Control VSC costat xarxa

Phase Loked Loop (PLL)

El primer pas de tots, és detectar la freqüència de la xarxa elèctrica, per aconseguir-ho es fa servir el *Phase Loked Loop* (PLL). És un procés senzill i ràpid que permet detectar la freqüència i l'angle de les tensions de la xarxa i les seves possibles variacions de forma dinàmica. Amb l'ajuda de la transformada de Park, es pot reconvertir les senyals trifàsiques en dues constants, molt més fàcils de controlar. A la figura 35, es mostra una esquema complet d'una PLL amb una xarxa ideal de tensió de línia de 400 V:

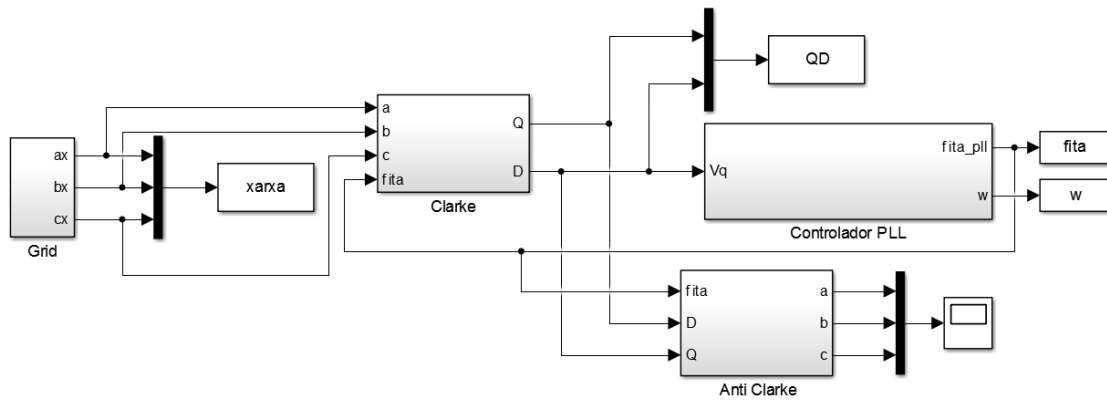


Figura 35. Esquema Simulink® de la PLL.

A continuació es defineix el control de la PLL:

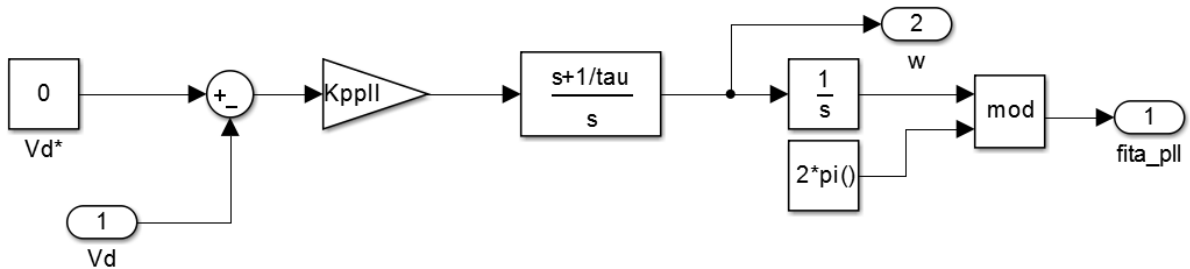


Figura 36. Control de la PLL.

La forma del controlador de la figura 36, està definida en l'article de (Chung, S. K. 2000). En aquest estudi, es suposa que l'error de l'angle es suficientment petit per tal de linealitzar el sistema, obtenint així un de segon ordre:

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{2\varepsilon\omega_n + \omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n + \omega_n^2} \quad (37)$$

On $\hat{\theta}$ és l'angle estimat de xarxa i $\theta(s)$ és l'angle real de xarxa. En el mateix article queda definit el controlador:

$$K_f(s) = K_p \left(\frac{\frac{1}{\tau_{pll}} + s}{s} \right) \quad (38)$$

On els dos paràmetres queden definits en les següents expressions extretes de la equació de segon ordre:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p E_m}{\tau_{pll}}} \quad (39)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\tau_{pll} K_p E_m}}{2} \quad (40)$$

On:

E_m és el valor de pic admès de la tensió

ε és el factor d'esmoreïment

ω_n és la freqüència natural

Durant el disseny de la PLL s'ha de tenir en compte que la resposta sigui ràpida i que pugui filtrar correctament. Segons l'article (Chung, S.K. 2000), amb una freqüència natural de 628 rad/s s'obtenen bons resultats. Amb un valor típic d'esmoreïment de 0,707 i la xarxa anteriorment descrita, obtenim els següents resultats:

$$K_p = 2,7189$$

$$\tau_{pll} = 0,0023$$

A la figura 37, es pot observar que en temps 0.015 segons ja s'ha estabilitzat a la freqüència de la xarxa a 314 rad/s (50 Hz). Per saber el senyal que es necessita per a fer la transformada i la anti-transformada només cal integrar aquesta freqüència.

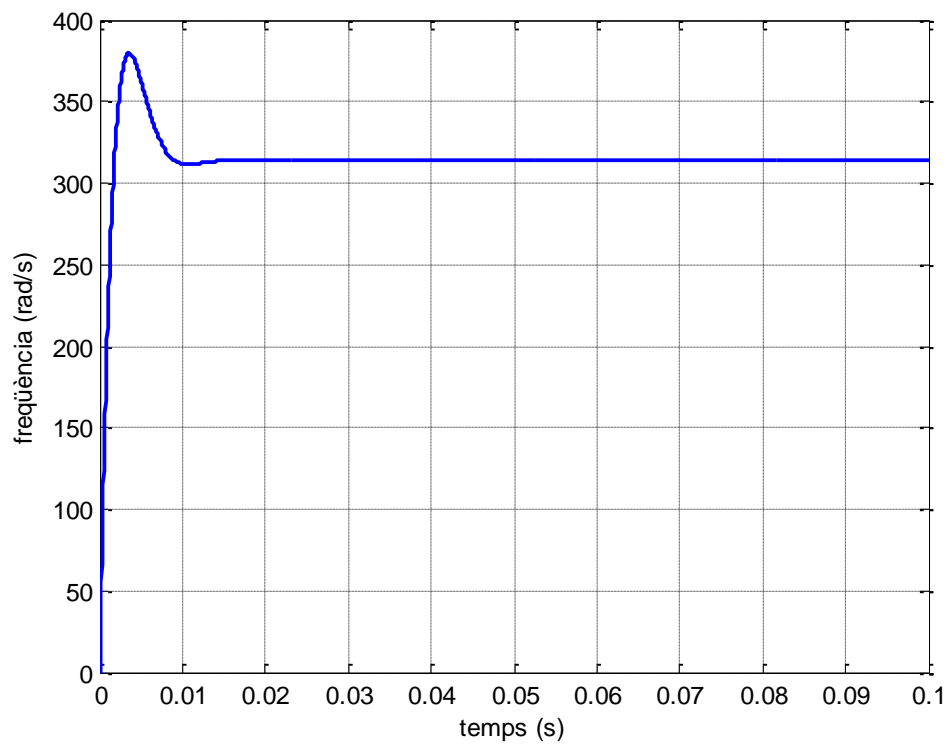


Figura 37. Freqüència de la xarxa.

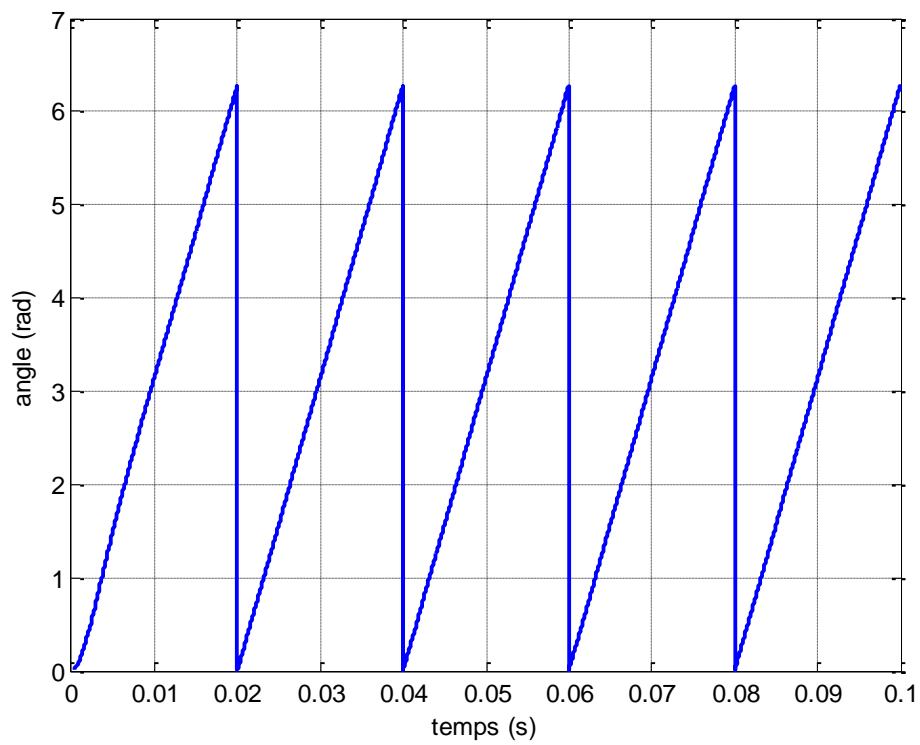


Figura 38. Angle de pulsació de la xarxa.

Es pot observar que la PLL utilitzada és un bon mètode per detectar l'angle de xarxa, per tant, només calculant les noves constants per a diferents tensions, ha de ser suficient per a saber la freqüència en qualsevol cas.

Llaç de corrent

Per començar, s'explica la part de alterna per tal de controlar les corrents i les tensions que circulen des del convertidor a la xarxa o viceversa. Aplicant la tensió de la xarxa ideal anteriorment definida en les equacions de (31) i tenint en compte el filtre d'acoblament de cada fase (RI i LI) es pot connectar a la part del convertidor i aplicar-hi les tensions controlades (v) des de el mateix. L'esquema equivalent es mostra a la figura 39:

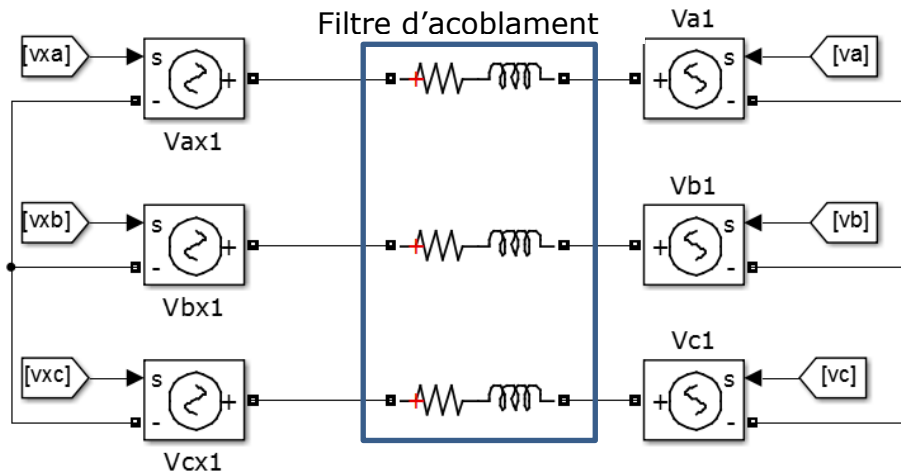


Figura 39. Esquema Simulink® del llaç de corrent.

L'equació matricial que es pot deduir és la següent:

$$v_x^{abc} - v^{abc} = R_l \cdot i_l^{abc} + L_l \cdot \frac{d}{dt} i_l^{abc} \quad (41)$$

Els valor de la resistència i la inductància del filtre són 0.5Ω i 5.4 mH respectivament.

Un cop definida, aplicant la transformada de Park utilitzant com a referència les tensions de xarxa, s'obtenen les noves variables en qd0 sense considerar la variable homopolar:

$$\begin{bmatrix} v_{xq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l & -L_l \omega_e \\ L_l \omega_e & R_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 \\ 0 & L_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} \quad (42)$$

On queden definides les següents variables:

Nom variable	Símbol
Tensió de xarxa q	v_{xq}
Tensió convertidor q	v_q
Tensió convertidor d	v_d
Velocitat angular de la xarxa	ω_e

Intensitat component q	i_{lq}
Intensitat component d	i_{ld}

Taula 13. Definició de les variables del VSC

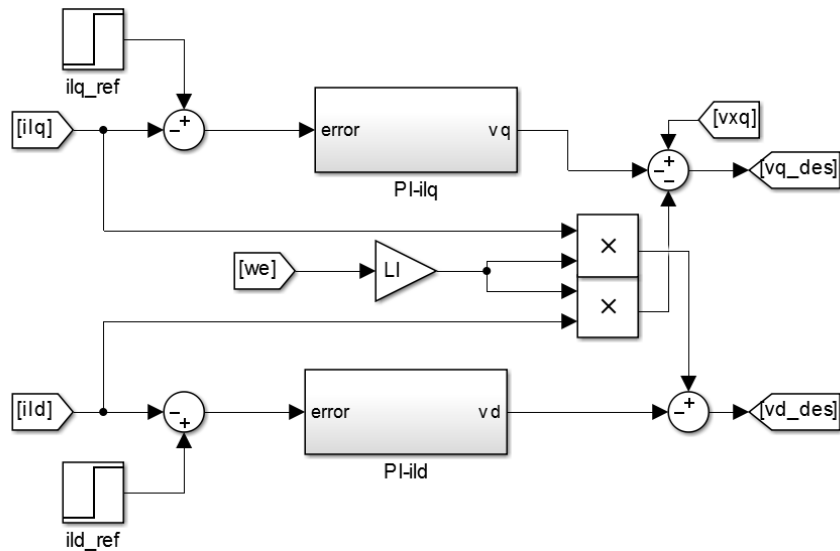
S'observa que el sistema depèn de la velocitat angular de xarxa i que ambdues components queden totalment acoblades. Aquets dos fets poden ocasionar problemes en el control i complicar-lo. Per tal de evitar-ho, es fa servir un feed-forward, que a la pràctica és un canvi de variables:

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_q + v_{xq} - L_l \omega_e i_{lq} \\ -\hat{v}_d + L_l \omega_e i_{ld} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Substituint la anterior fórmula en la equació (42), s'obté un sistema de dos equacions diferencials lineals ordinàries de primer ordre:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_q \\ \hat{v}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l & 0 \\ 0 & R_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 \\ 0 & L_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} \quad (44)$$

Un cop conegudes les equacions que es defineixen al Simulink® amb el control corresponent:

**Figura 40. Esquema Simulink® del control del llaç de corrent.**

Cal afegir que l'angle de la xarxa s'extreu de la PLL i que s'ha fet servir per poder convertir les senyals abc a qd. També cal destacar que apareixen 4 nous blocs, dos steps que fan la funció de referència de la intensitat (s'utilitzarà més endavant per comprovar el bon funcionament del llaç) i dos blocs de control Proporcional Integral (PI) que s'expliquen a continuació.

Per poder conèixer quines són les constants a aplicar en el controlador, primer cal passar a domini de Laplace les equacions de xarxa:

$$\begin{bmatrix} i_{lq}(s) \\ i_{ld}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_l + L_l s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_l + L_l s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_q \\ \hat{v}_d \end{bmatrix} \quad (45)$$

El disseny per tal de generar ambdues tensions es un controlador PI dissenyat pel mètode Internal Model Control (IMC) (Egea-Alvarez, A., Junyent-Ferré, A., & Gomis-Bellmunt, O., 2012, 17-18) ignorant les limitacions del convertidor a l'hora d'aplicar les tensions. S'acaba deduïnt que les constants són:

$$K_p = \frac{L_l}{\tau} \quad (46)$$

$$K_i = \frac{R_l}{\tau} \quad (47)$$

On la constant de temps τ és de 10 ms.

Un cop definides les constants de control, només cal marcar quines seran les dues referències:

Temps (s)	$i_{lq}ref$	$i_{ld}ref$
0	250	0
0.5	500	0
0.75	500	500
1	500	500

Taula 14. Canvis de la consigna de referència de la corrent en q i en d.

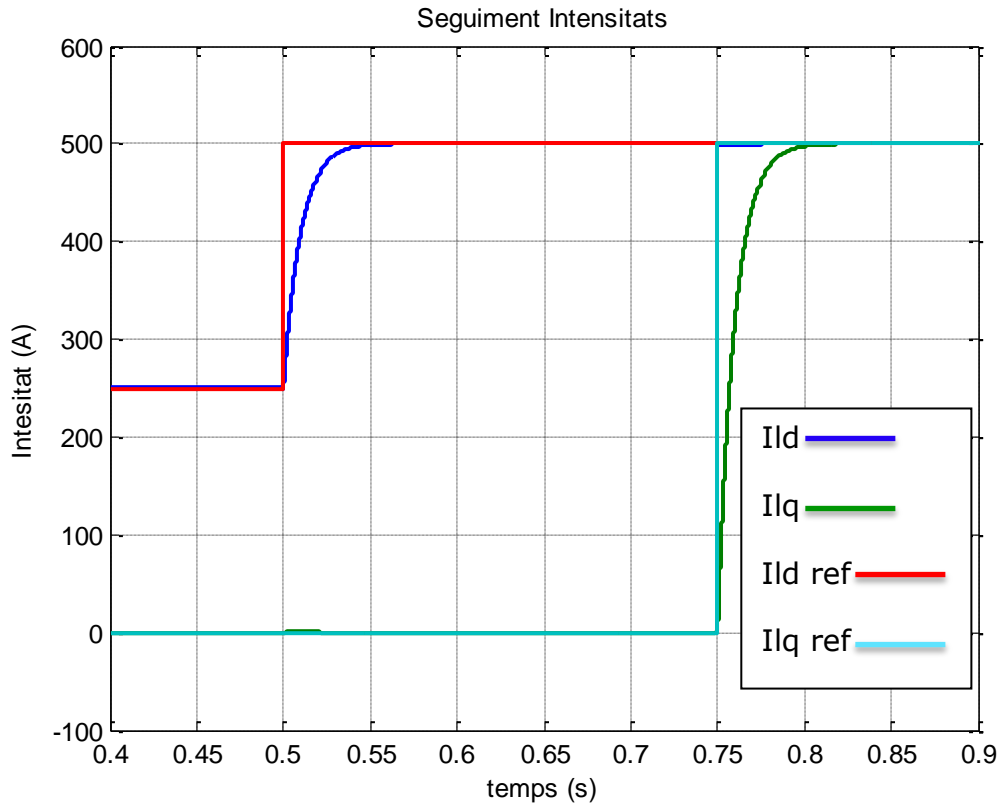


Figura 41. Resposta de les intensitats en el llaç de corrent.

A la figura 41 s'observa que les intensitats segueixen correctament les seves referències i que el control actua d'una forma desitjada. Per tant, el llaç de corrent està ben implementat.

Llaç de tensió i càlcul de les referències

Per tal de poder controlar els fluxos de potència de la xarxa i com s'utilitza un VSC, es connecta un condensador en paral·lel a cada convertidor.

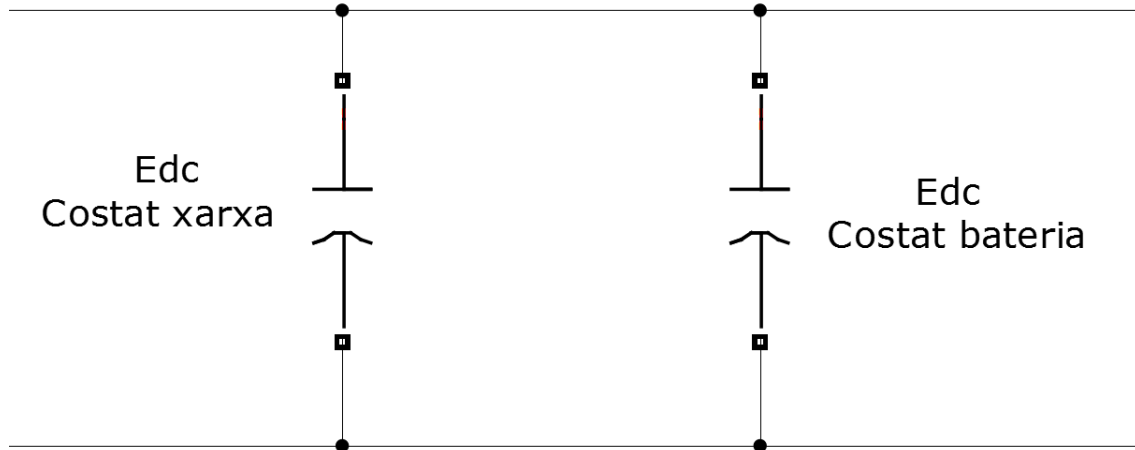


Figura 42. Esquema Simulink® del bus de contínua.

En el bus de contínua actua com a font de tensió gràcies al condensador que hi ha connectat entre els terminals. A la figura 42 s'observen els dos condensadors per cada convertidor.

En el teorema de potència instantània en referència de sincronisme (Egea-Alvarez, A., Junyent-Ferré, A., & Gomis-Bellmunt, O., 2012, 11) queden definides les següents equacions per definir la potència activa i reactiva:

$$P = \frac{3}{2}(v_q i_q + v_d v_d) \quad (48)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d v_q) \quad (49)$$

Un cop definides i aplicant la suposició de que $v_d=0$, s'obtenen les referències desitjades en funció del voltatge i la potència marcada:

$$i_q = \frac{2 \cdot P}{3 \cdot v_q} \quad (50)$$

$$i_d = \frac{2 \cdot Q}{3 \cdot v_q} \quad (51)$$

On la tensió en q és la tensió de xarxa transformada.

Per poder mantenir la tensió de referència en el bus de contínua, s'ha de dissenyar un control utilitzant les equacions (50) i (51). Donant per fet que

la $i_d=0$, ja que només interessa la potència activa, la expressió (51) queda anul·lada.

Pel correcte funcionament, s'han de fer tres suposicions més (Junyent-Ferré 2007):

- El convertidor té un rendiment del 100%. La potència en el costat de continua té el mateix valor que la intercanviada en el costat de alterna. (1)

$$P_{AC} = P_{DC} \quad (52)$$

- La capacitat del condensador és molt gran, el que fa que la evolució de la tensió sigui lenta i es pot dir que es manté constant al llarg del temps. (2)
- El llaç de corrent de i_{lq} és suficientment ràpid com per poder suposar-lo com una font de corrent ideal. (3)

Tenint en compte la suposició 1 i aïllant la intensitat desitjada:

$$i_{DC} = \frac{3}{2} \frac{v_q}{E_{DC}} i_{lq} \quad (53)$$

S'obté un sistema lineal que permet dissenyar un sistema de control per tal d'obtenir la intensitat de referència per el llaç de corrent prèviament definit.

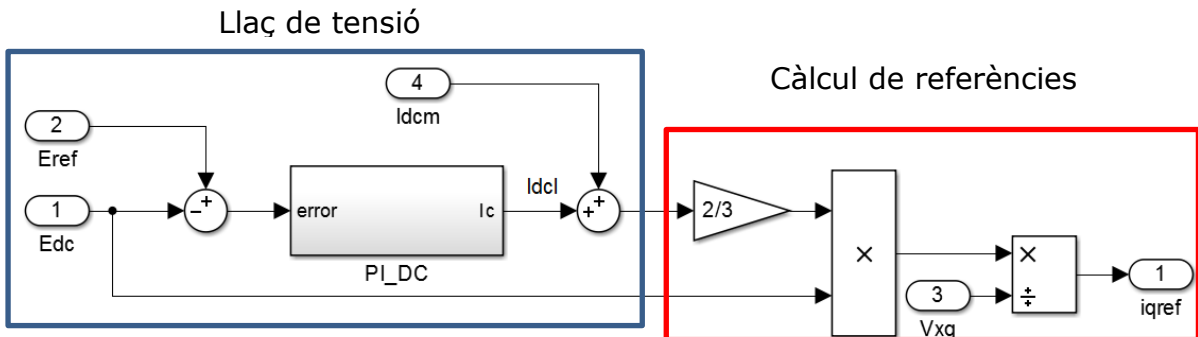


Figura 43. Esquema dels blocs del llaç de tensió i el càlcul de referència per el corrent q de referència.

En la figura 43 s'observa el model del llaç de tensió, on el control es basa amb un controlador PI definit en les equacions (54) i (55), també s'inclou un llaç de control anticipatiu que permet regular les variacions sobre el sistema. Del control surt la consigna de corrent continu, que es tracta pel teorema de potència instantània obtenint el corrent de referència pel llaç de corrent.

$$k_p = \frac{4C}{3} \frac{E_{DC}}{v_{xq}} \varepsilon \cdot \omega_n \quad (54)$$

$$k_i = \frac{2C}{3} \frac{E_{DC}}{v_{xq}} \omega_n^2 \quad (55)$$

Finalment, a la figura 44 s'observa l'evolució de la tensió del bus de contínua. El control actua d'una forma efectiva, estabilitzant la tensió als 800 V de referència i impedit que el pic inicial de la tensió superi el 5% de la tensió desitjada.

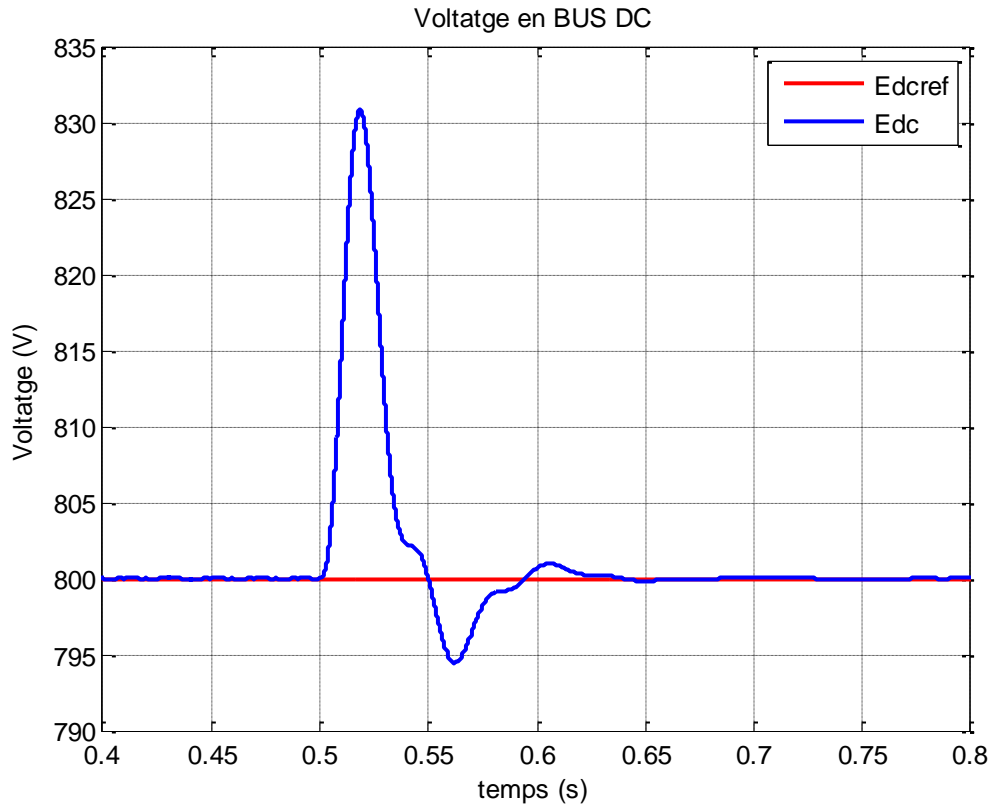


Figura 44. Voltatge controlat en el bus de contínua.

Conclusions del Convertidor AC/DC

Es pot veure clarament que les intensitats segueixen les seves referències i que el desacoblament produït pel canvi de variable ha fet el seu efecte, ja que es pot veure que en cada canvi de referència no hi ha cap variació en l'altra intensitat. També cal destacar que el controlador actua ràpidament amb el temps establert, ja que en 10 ms ja ha arribat al 63% del valor final marcat. Per tant, queda demostrat que el llaç de corrent funciona i és efectiu.

Pel que fa el bus de contínua, la tensió queda regulada correctament i el transitori queda acotat en uns marges suficientment segurs.

Així doncs, el model simplificat del convertidor funciona correctament i actua de la forma esperada.

5.4. Bateria

La bateria que fa servir el Nissan Leaf és de Ió-Liti del tipus $\text{Li-Mn}_2\text{O}_4$ amb Li-NiO_2 /Grafit amb les següents característiques:

Característiques de la Bateria	
Nº de cel·les	192
Voltatge Nominal per cel·la [V]	3,8
Voltatge Nominal del sistema [V]	364,8
Capacitat Nominal [Ah]	66,2
Energia Nominal [kWh]	24
Pes total [kg]	294

Taula 15. Característiques de la bateria del Nissan Leaf.

Amb aquestes dades i gracies a un model programat pel Simulink trobat al web de Mathworks, es pot simular el comportament d'una bateria mostrat a la figura 45. Cal destacar que té certes limitacions:

- No es té en compte la temperatura.
- L'auto descàrrega no es contempla.
- La resistència interna de la bateria es suposa constant durant el procés.
- La capacitat de la bateria no canvia segons l'amplitud del corrent (l'efecte Peukert no es simula).

Block Parameters: 364.8 volts, 66.2 Ah Leaf battery

Battery (mask) (link)
Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters View Discharge Characteristics Battery Dyna

Battery type Lithium-Ion

Nominal Voltage (V)
364.8

Rated Capacity (Ah)
66.2

Initial State-Of-Charge (%)
40

☒ Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah)
66.2

Fully Charged Voltage (V)
424.6225

Nominal Discharge Current (A)
28.7826

Internal Resistance (Ohms)
0.055106

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage
59.8678

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]
[394.1248 3.252435]

OK Cancel Help Apply

Figura 45. Taula del Simulink® per inserir les característiques de la bateria.

5.5. Convertidor DC/DC bidireccional

Abans de connectar els borns de la bateria, la tensió contínua s'ha de regular al nivell operatiu de la mateixa. Fent servir la mateixa lògica que en

el rectificador, s'utilitzarà un model simplificat del regulador *half-bridge* amb un filtre LCL acoblat com mostra la figura 46:

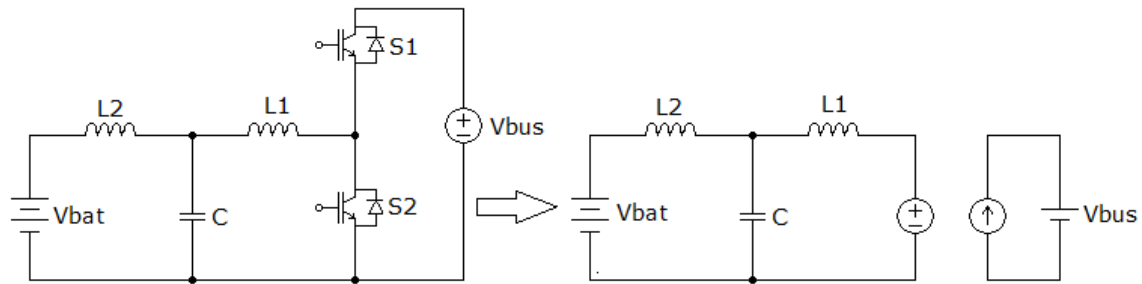


Figura 46. Esquemes del convertidor DC/DC Half-Bridge amb IGBTs i el model simplificat.

La elecció del filtre ajuda a obtenir una corrent amb menys soroll i amb un arrissat molt inferior d'una forma més compacte i eficient. Tant la font de corrent com la de tensió del model simplificat, són controlades regulant la tensió en el bus de contínua de la bateria.

5.5.1. Model Simplificat

Per tant, el model simplificat en Simulink® es mostra a la figura 47:

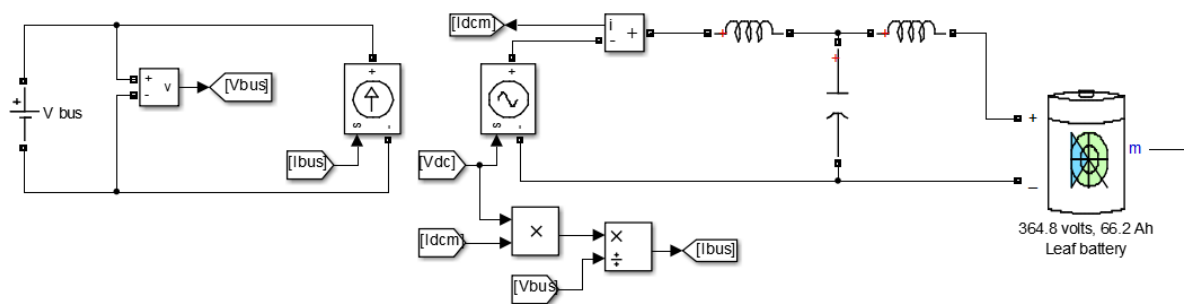


Figura 47. Esquema Simulink® complert del convertidor DC/DC simplificat..

Un cop definit el model, la variable a controlar per poder treballar és la tensió Vdc del bus de contínua de la bateria. Un cop controlat, es pot definir el corrent que circula en el bus de contínua del convertidor.

5.5.2. Control de la tensió del bus de la bateria

Llaç de corrent

Per poder controlar la tensió de bus de contínua de la bateria, s'aplica un llaç de corrent on la intensitat de referència ve definida per el BMS de les cel·les de la bateria.

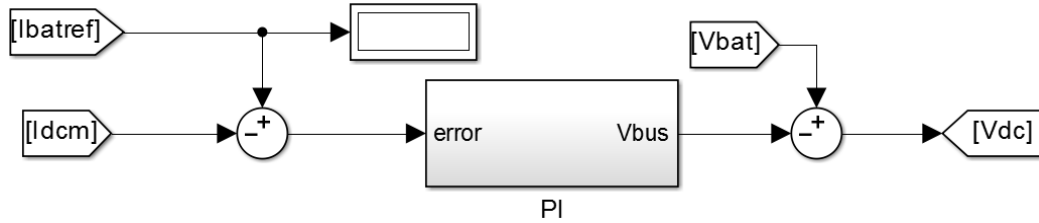


Figura 48. Esquema Simulink® del control de la tensió en el bus de la bateria.

Com es pot observar a la figura 48, la intensitat mesurada en el bus de contínua de la bateria, abans de arribar al filtre LCL, es compara amb la intensitat de referència. L'error es passa per un PI que es calcula de la mateixa forma que en un llaç de corrent, és a dir, amb el mètode IMC. El feed-forward que hi ha a continuació ajuda a que el control pugui predir més fàcilment els canvis que pot patir el control.

Un cop es coneix la tensió que ha de actuar en la font de tensió, s'ha de definir la intensitat que circularà per el bus de continua. Per tal de poder-la calcular, s'ha de tenir en compte que el rendiment és del 100% i per tant, el teorema de potència instantània és:

$$P_{DC} = P_{bat} \rightarrow V_{bus} \cdot I_{bus}^* = V_{bat} \cdot I_{bat} \quad (56)$$

On I_{bus}^* és la intensitat de referència del bus de continua.

5.5.3. Simulació del convertidor DC/DC

Es comprova el correcte funcionament del regulador de tensió amb les següents variables:

Magnituds del convertidor		
Voltatge del bus DC (Vbus)	750	V
Resistència llaç corrent (R)	10	mΩ
Inductància llaç corrent (L)	1	mH
Inductància 1 filtre (L1)	0.2	mH
Inductància 2 filtre (L2)	0.05	mH
Capacitat filtre (C1)	55	mF
tau llaç corrent (τ)	10	ms

Taula 16. Magnituds del convertidor DC/DC.

Com que els carregadors ràpids de tipologia CHAdeMO® donen impulsos d'intensitat al control definits pel BMS es construeix un bloc *Repeating Sequence Stair* definit a la figura 49:

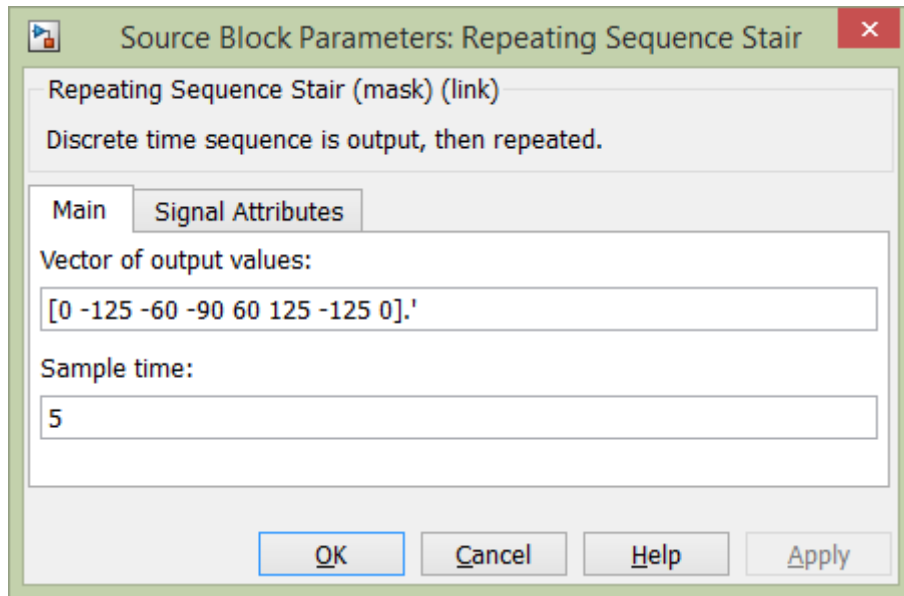


Figura 49. Pulsos de la intensitat de referència del BMS.

S'observa que cada segons hi haurà un canvi en la intensitat de referència.

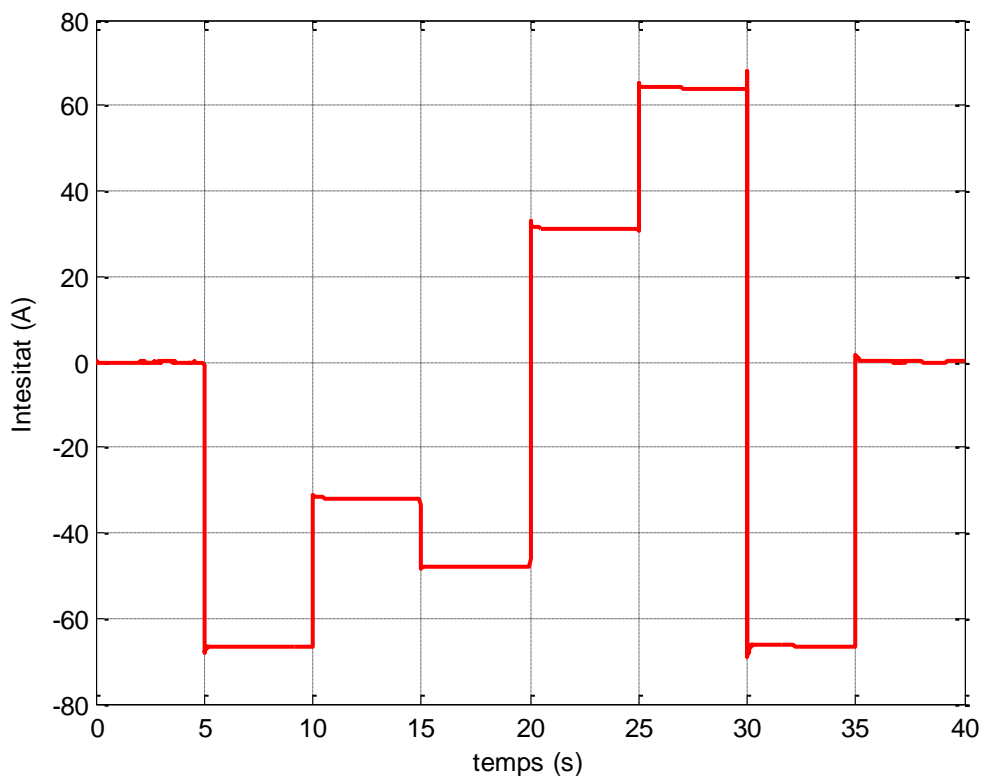


Figura 50. Intensitat del bus de contínua al costat del convertidor.

A la figura 50 es pot veure que l'evolució de la intensitat del bus de continu del costat del convertidor segueix el patró marcat per el BMS, l'única cosa a tenir en compte és que el dividir-se per la tensió del bus del costat del convertidor, 750 V, la intensitat baixa per mantenir la potència constant.

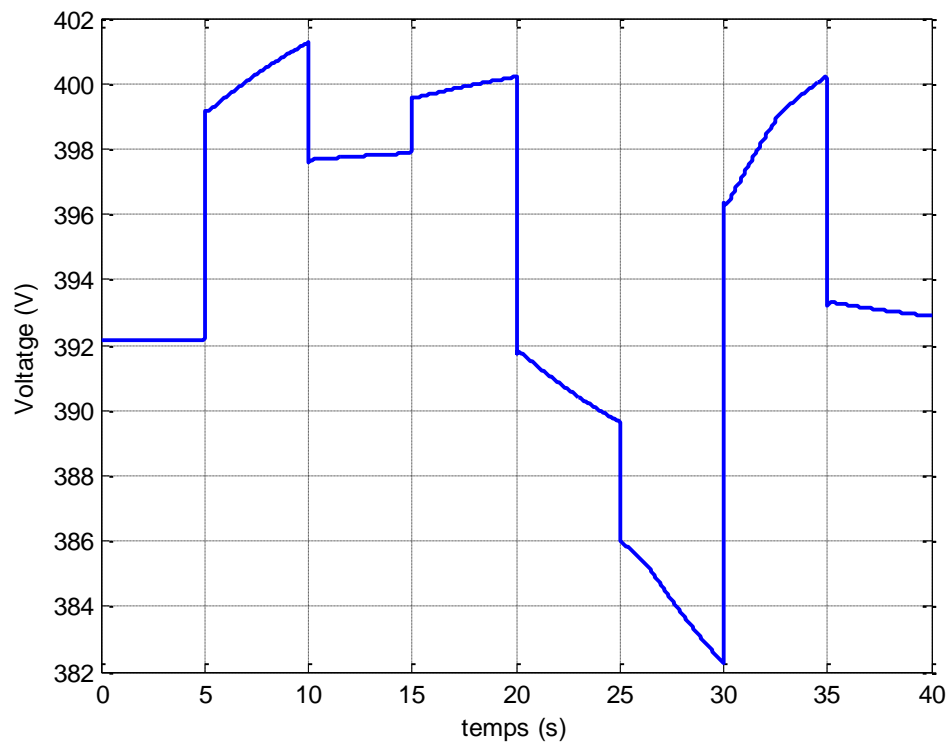


Figura 51. Evolució de la tensió en borns de la bateria.

A la figura 51 s'observa com la bateria actua de la forma esperada, amb les variacions en el voltatge en els moments de càrrega i descàrrega. Es veu que el comportament varia segons en l'estat que estigui.

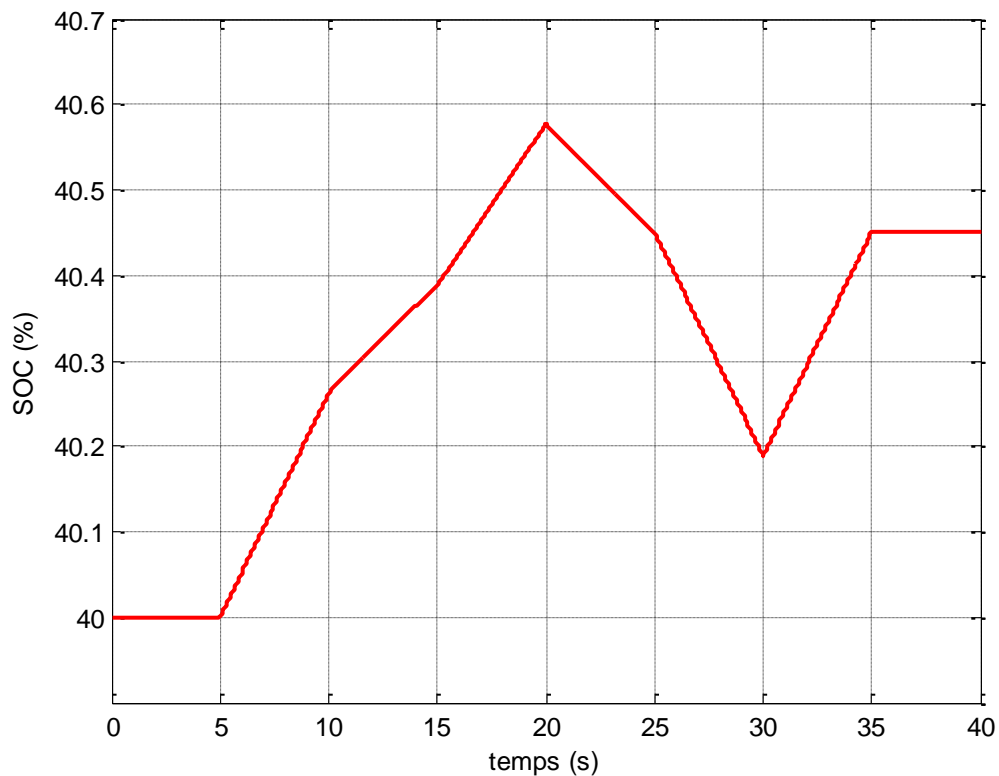


Figura 52. Evolució del SOC de la bateria.

Per acabar, la figura 52 mostra la càrrega i la descàrrega de la bateria demostrant que pot ser utilitzada com una font d'energia en moments de necessitat (V2G).

Conclusions convertidor DC/DC

Observant les figures de l'apartat anterior, queda demostrat que el model simplificat del convertidor queda ben definit i actua d'una forma idònia. El filtre LCL fa el seu paper filtrant els soroll del control millorant la vida útil de la bateria.

També es demostra, que la bateria es pot utilitzar com a subministrador d'energia en moments puntuals, el conegut com V2G.

5.6. Punt de càrrega

5.6.1. Introducció

Un cop demostrat el correcte funcionament d'ambdós convertidors i els seus respectius controls, s'ajunta tot i es connecta la xarxa amb la bateria.

Consideracions

S'ha de considerar que el control del convertidor AC/DC serà 10 cops més ràpid que el DC/DC, ja que si no fos així, les pertorbacions inutilitzarien el sistema.

Per poder absorbir tota la potència, s'ha optat per modificar el condensador del costat del bus de contínua de bateria per un de 3680 μF sumant un total de 4700 μF en la configuració del bus de contínua. Aquest fet canvia també les magnituds de les constants de control de la tensió del bus de contínua.

Es simulen 4 segons on es pot observar les diverses pertorbacions degudes als canvis de la intensitat de referència provocats pel BMS. El patró del bloc *repeating sequence stair* és el mateix que en l'apartat 5.5.3. però la freqüència de mostreig és 10 cops inferior.

5.6.2. Definició de les variables

En el model sencer, les variables queden definides a la següent taula:

Nom	Valor	Unitats
Amplitud de la tensió (A)	400	V
Freqüència de xarxa (f)	50	Hz
Resistència del convertidor (R)	10	$\text{m}\Omega$
Inductància del convertidor (L)	1	mH
Tau de la PLL (τ_{pll})	0.0023	ms
Constant proporcional PLL (K_{ppll})	2.7189	--
Tau llaç de corrent (τ)	1	ms

Taula 17. Magnituds de la xarxa.

Les constants restants dels controls de la PLL i el llaç de corrent, queden definits de la següent manera:

Constant integral PLL:

$$K_{ipll} = \frac{1}{\tau_{pll}} \quad (57)$$

Constant proporcional i integral llaç de corrent:

$$k_{pcc} = \frac{L}{\tau} \quad (58)$$

$$k_{icc} = \frac{R}{\tau} \quad (59)$$

Nom	Valor	Unitats
Tensió de referència del bus (E_{dcref})	750	V
Resistència del bus (R_{bus})	1	$\text{m}\Omega$
Inductància del bus (L_{bus})	1	μH
Condensador del bus (C)	4.7	mF
Factor d'esmoreïment (Epsilon)	0.707	--

Taula 18. Magnituds del bus de contínua costat convertidor.

Tant la resistència com la inductància del bus de contínua, apareixen perquè el cable pot ser modificat i dimensionar-lo per a una estació on la manega sigui més llarga. En el nostre cas, com només tenim uns pocs metres de cable, es consideren molt petites.

Pel que fa les constants de control del bus, queden definides com:

$$k_{pdc} = \frac{4C}{3} \frac{Ed_{cref}}{U_p} \varepsilon \cdot \omega_e \quad (60)$$

$$k_{idc} = \frac{2C}{3} \frac{Ed_{cref}}{U_p} \omega_e^2 \quad (61)$$

On la tensió de pic (U_p) és:

$$U_p = A \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (62)$$

I la freqüència natural es defineix com:

$$\omega_e = \frac{1}{\tau_{DC}} \quad (63)$$

Amb la τ_{DC} 10 cops més petita que la del llaç de corrent.

Nom	Valor	Unitats
Amplitud de la tensió (A)	400	V
Resistència llaç corrent (R_{bat})	10	mΩ
Inductància llaç corrent (L_{bat})	1	mH
Inductància 1 filtre (L1)	0.2	mH
Inductància 2 filtre (L2)	0.05	mH
Capacitat filtre (C1)	55	mF
Tau llaç corrent (τ_b)	10	ms

Taula 19. Magnituds del bus de continu del costat de la bateria.

Amb els valors de les constants de control com:

Constant proporcional i integral llaç de corrent:

$$k_{pcb} = \frac{L_{bat}}{\tau_b} \quad (64)$$

$$k_{icb} = \frac{R_{bat}}{\tau_b} \quad (65)$$

Per acabar, la intensitat de referència que defineix el BMS, es defineix amb el bloc *Repeating Sequence Stair*, que simula diferents entrades de intensitat.

El bloc de intensitat, queda definit de la següent manera:

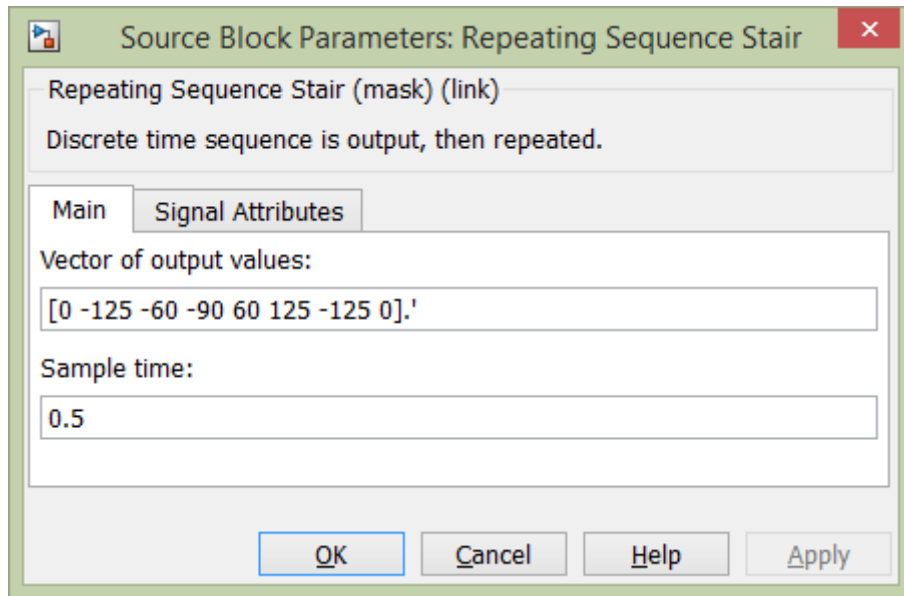


Figura 53. Definició dels esglaons per la potència de referència.

Com que hi ha 8 impulsos amb una freqüència de 0,5 segons, es defineix un temps total de simulació de 4 segons per poder observar el seu efecte.

5.6.3. Resultats de la simulació

Un cop tot definit, es procedeix a la simulació obtenint els següents resultats:

Tensió de BUS DC

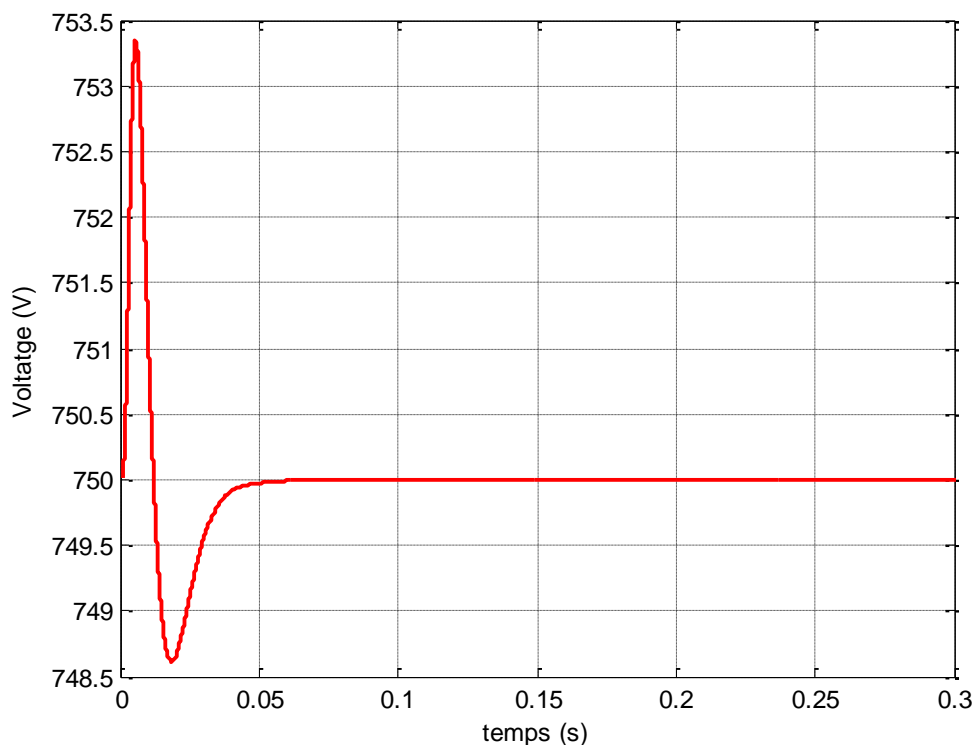


Figura 54. Evolució de la tensió del bus de continua fins el segon 0.3.

En el bus de continua, tal com mostra la figura 54, els que es busca es mantenir el més estable possible la tensió per tal de poder treballar amb ella d'una forma més senzilla. En la figura anterior es pot observar que després del transitori inicial, en el segon 0.05 la tensió queda estabilitzada als 750 V marcats.

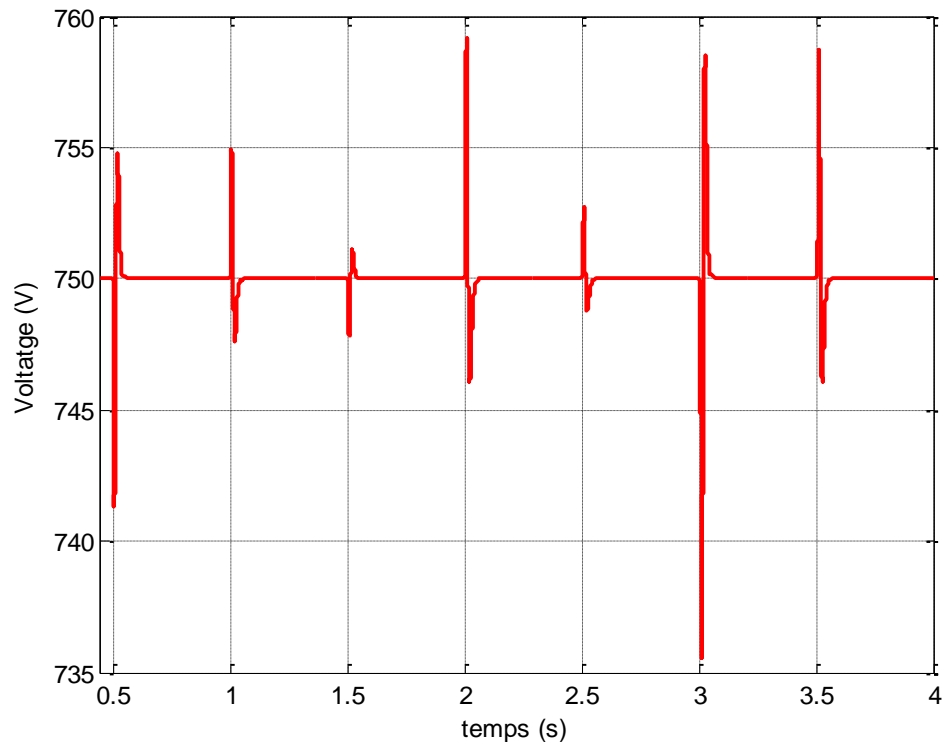
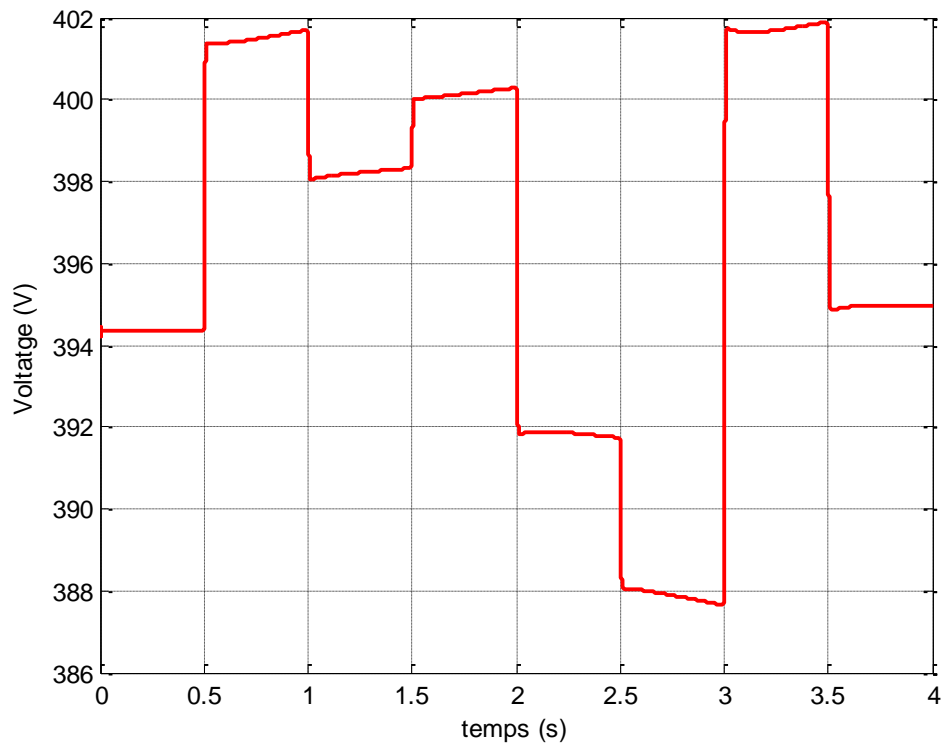


Figura 55. Evolució de la tensió del bus de continua entre el segon 0,45 fins el 4.

A la figura 55 s'observa que un cop s'arriba als 0,5 segons, es dona l'ordre d'injectar 125 A a la bateria. Això produeix un transitori que gràcies al control, s'aconsegueix que quedin controlats i estabilitzats a 750 V als 200 ms. Com que cada 0,5 segons hi ha un canvi en la intensitat de referència es produeixen nous transitoris cada inici de període. Aquest transitori comença amb un pic inferior si el BMS demana més amperatge a la xarxa que en l'estat anterior, mentre que s'eleva la tensió si l'amperatge demanat és inferior o la xarxa està demanant energia com s'observa en el segon 2 on es demanda potència des de la xarxa.

Afegir que el pic serà més elevat sempre que hi hagi més diferència entre l'estat anterior i l'actual. En cap cas es supera el 5% dels 750 V i per tant compleix amb la normativa de baixa tensió.

Tensió de la bateria***Figura 56. Evolució de la tensió de la bateria durant la càrrega.***

A la figura 56 es pot extreure que degut a les propietats de la bateria, on la tensió no es constant depèn del SOC en cada moment i del flux de intensitat que estigui governant-la en cada instant, per tant es pot observar que entre el segon 0,5 fins el 2 la bateria està carregant-se fins que es dona l'ordre de convertir-se en generador durant un segon (del 2 al 3) on la tensió baixa fins el 387,5 V en el cas més extrem. A continuació torna a rebre l'ordre de carregar-se durant 0,5 segons i la tensió s'eleva fins els 402 V. L'ordre final és la de desconnectar-se i la tensió es queda a un nivell un pel superior al inicial mantenint-se estable.

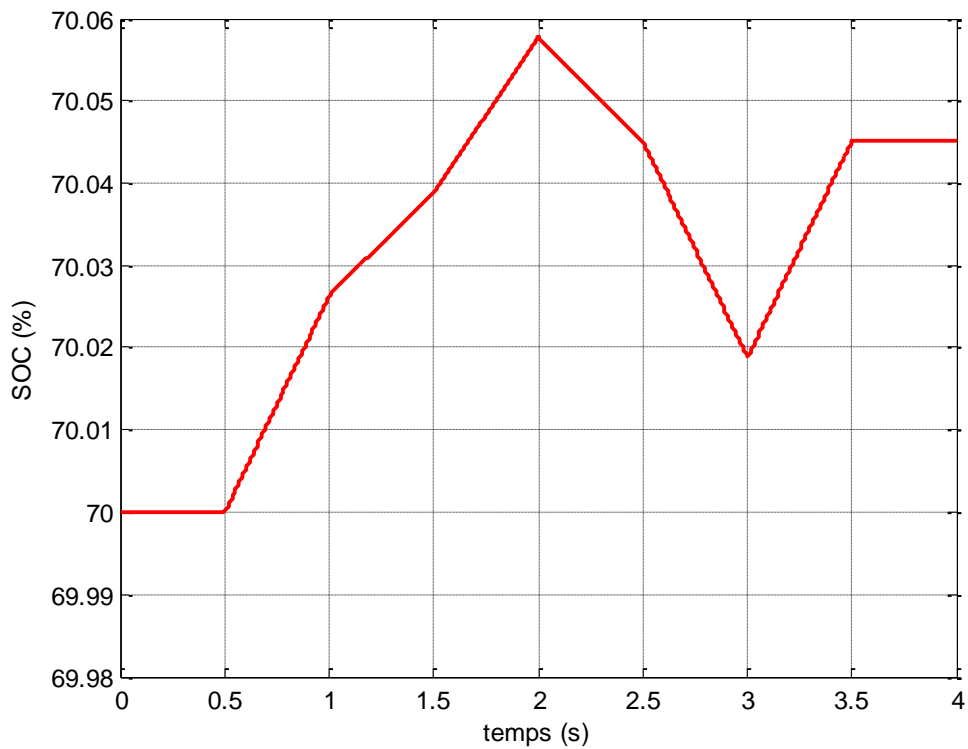


Figura 57. Evolució de l'estat de càrrega de la bateria durant el procés.

Com s'ha vist i explicat a la figura 56, en la figura 57 s'observa l'evolució del SOC demostrant que la bateria pot funcionar com a font d'alimentació si es requereix.

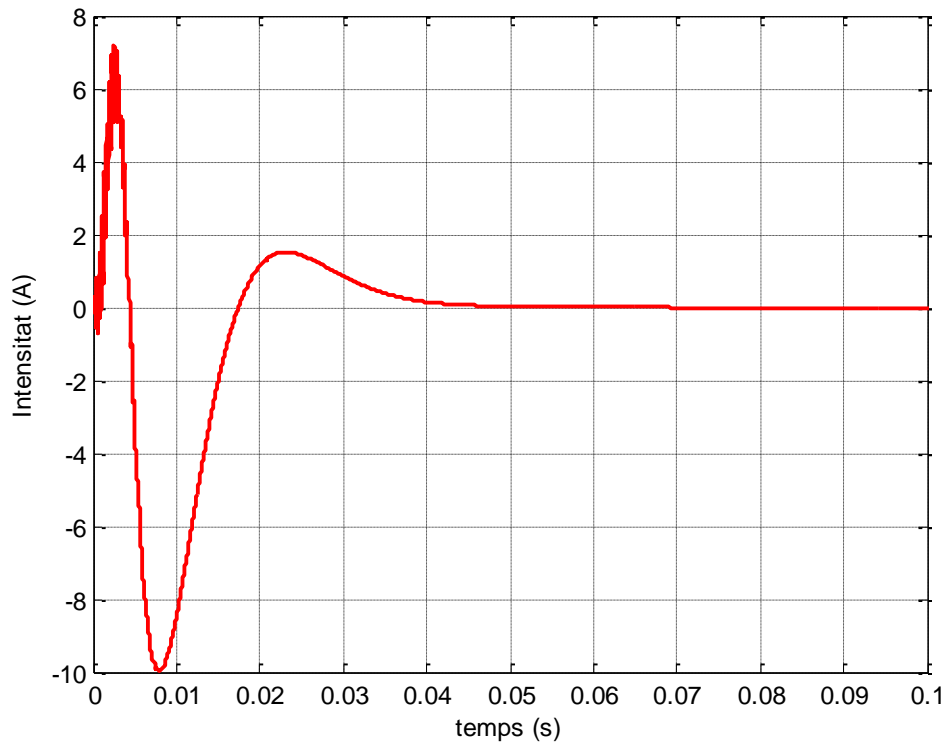
Intensitats del convertidor

Figura 58. Transitori inicial de la intensitat de referència del llac de corrent del convertidor AC/DC.

La intensitat més important, la que circula pel convertidor, ve definida per la de referència calculada per mantenir els 750 V en el bus de contínua del costat convertidor. Aquesta intensitat, quan no hi ha flux d'energia, ha de ser idealment 0, però al encendre el convertidor, degut als càlculs inicials de la PLL i les transformacions, pateix un petit transitori inicial que queda ben resolt en menys de 50 ms. Una ràpida resposta d'aquest control, garanteix el bon funcionament de la resta del convertidor.

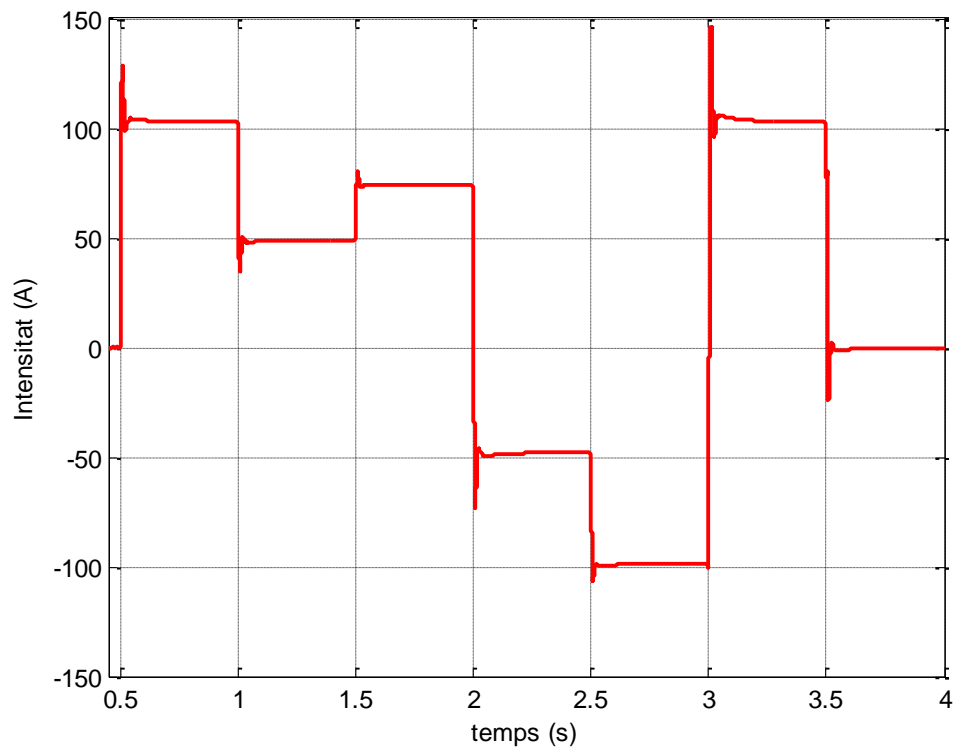


Figura 59. Evolució de la intensitat de referència pel llac de corrent del convertidor AC/DC.

Durant els impulsos, com es demostra a la figura 59 la intensitat respon ràpidament als canvis, per tant, s'efectua un correcte funcionament del llac. El pic de corrent sempre serà més elevat quan més agressiu sigui el canvi.

Pel que fa les corrents convertides en AC, hi ha dos moments crítics, la connexió i els transitoris:

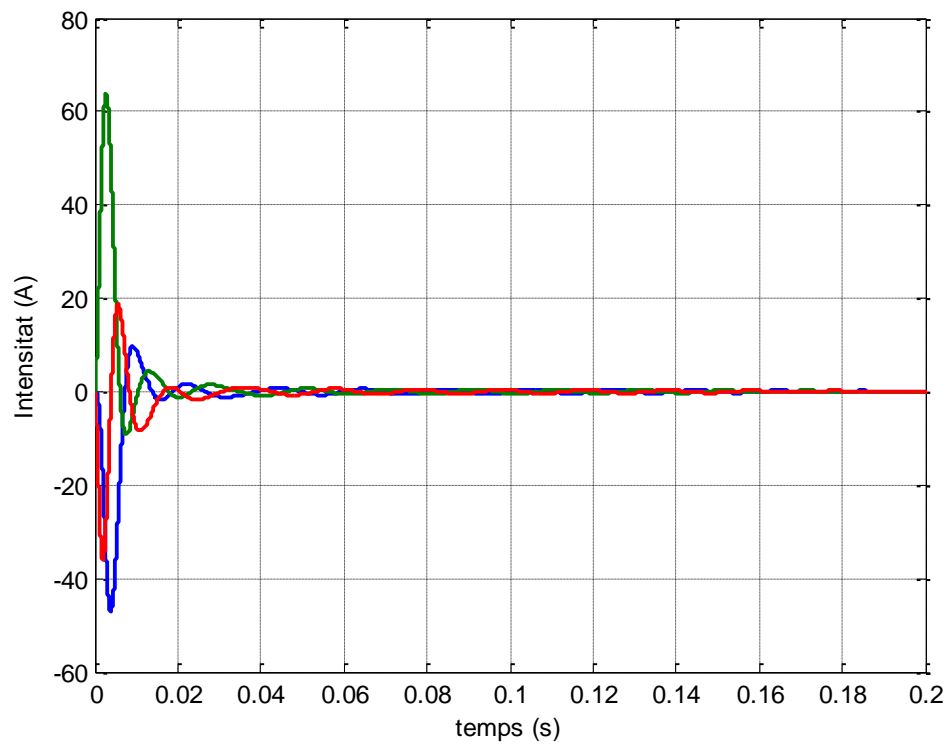


Figura 60. Transitori inicial, des de el segon 0 fins 0,2, de les intensitats de cada fase en la part AC del convertidor AC/DC.

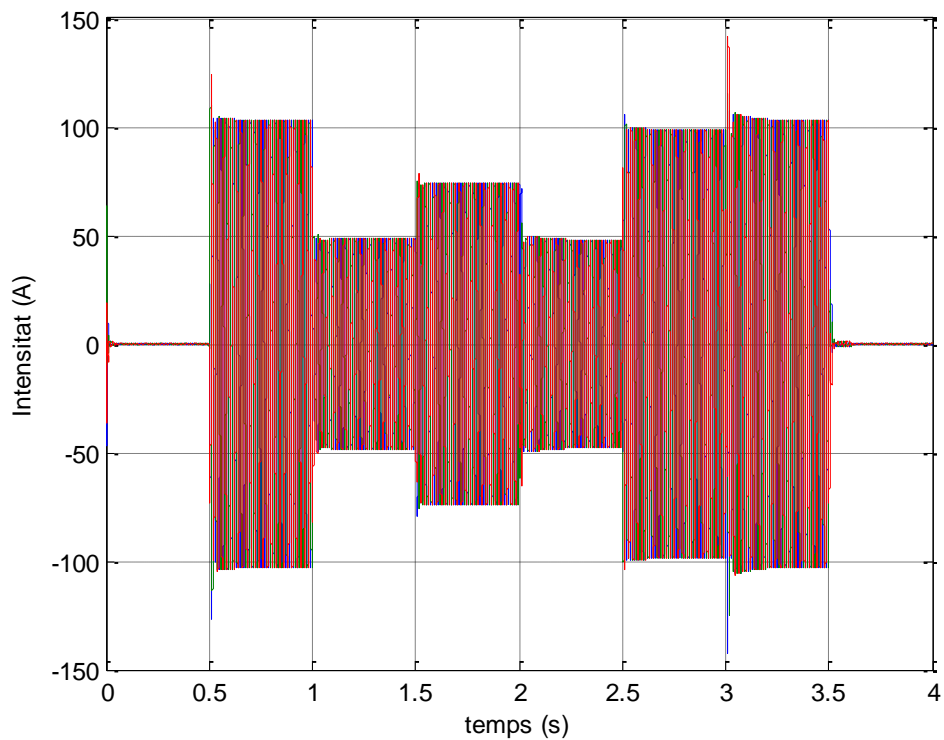


Figura 61. Evolució de les intensitats de cada fase AC del convertidor AC/DC durant tota la simulació.

A la figura 60, s'observa la ràpida actuació dels controladors per establir la intensitat que circula pel convertidor.

Un cop comencen els diferents impulsos de potència, a la figura 61 s'observa que les corrents trifàsiques fluctuen i permeten el flux de potència entre la xarxa i la bateria. Els controls garanteixen el bon funcionament del sistema absorbint de forma eficaç els canvis produïts.

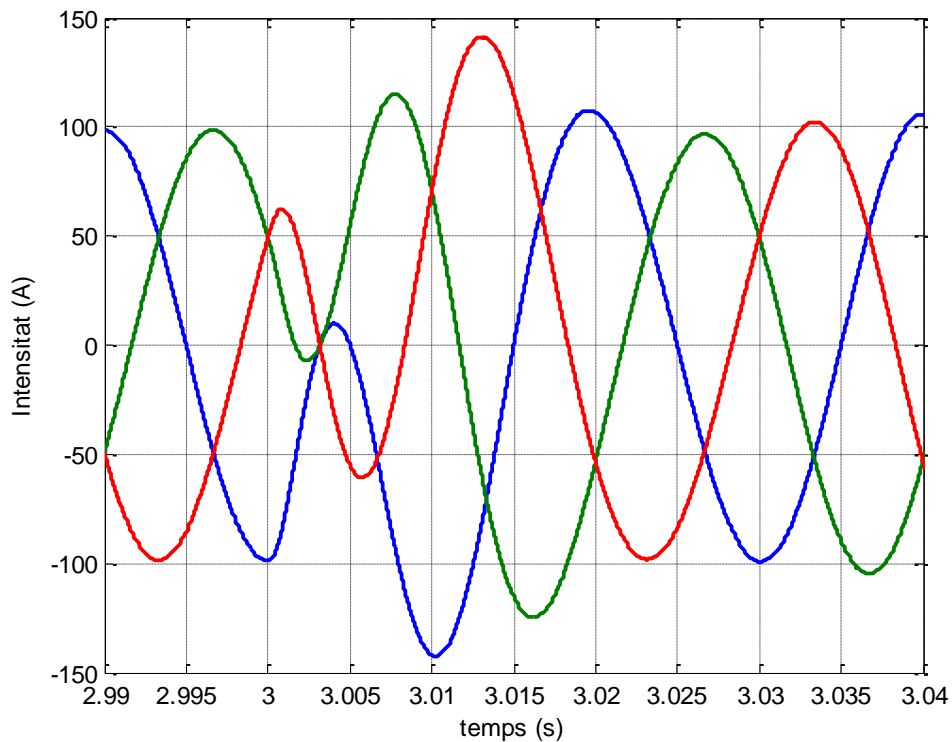


Figura 62. Detall del canvi de les intensitats en el segon 3 on la bateria passa de ser font d'energia a consumidora.

Per últim, a la figura 62 es veu amb detall com les intensitats canvien de signe en el moment que la xarxa deixa de demanar-li energia i es torna a carregar. El transitori es produeix de forma suau considerant que el BMS passa de donar 125 A a demanar-los.

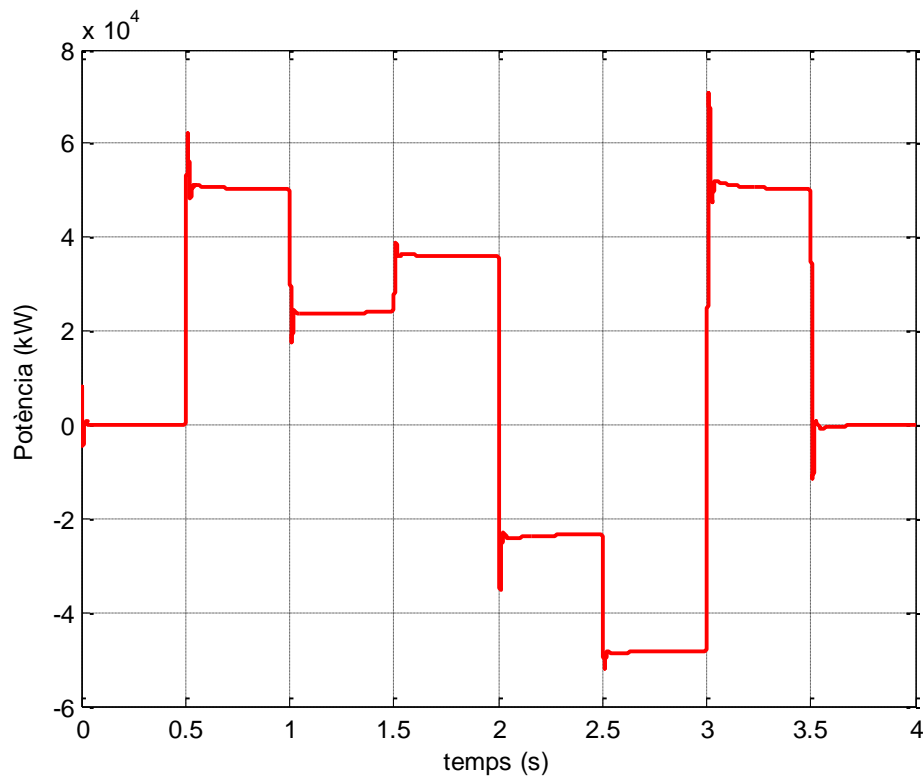
Potència

Figura 63. Potència del convertidor envers la de xarxa durant tot el procés.

Un altre cop s'observen els transitoris produïts durant els canvis en la intensitat donada pel BMS. La potència és negativa quan la bateria funciona com a font d'alimentació i positiva quan és una consumidora.

5.7. Conclusions de la simulació

La simulació duta a terme, ha estat realitzada correctament, mantenint la tensió del bus de continua a 750 V i la carregant les bateries fins el SOC desitjat.

S'ha demostrat que el carregador simplificat pot ser útil pel disseny de les diferents variables de control.

Capítol 6:

Conclusions

En el present projecte s'ha dimensionat una flota de vehicles de la Diputació de Barcelona per substituir-los per VEs. A continuació, s'ha optimitzat la recàrrega dels vehicles substituïts amb el GAMS[®]. Per acabar s'ha dissenyat el control d'un punt de càrrega ràpida amb Matlab/Simulink[®] per les possibles emergències que poguessin sortir en la necessitat d'ús d'un mateix VE al mateix dia.

El dimensionament és essencial per poder conèixer quin serà l'abast del bescanvi dels vehicles. Tot i que s'ha intentat reduir el màxim el nombre de vehicles, al final s'ha optat per a substituir la totalitat de la flota menys els híbrids (14 de 17), ja que hi ha dies que es necessiten tots els vehicles i la substitució dels híbrids no queda justificada al ser suficientment eficients. El que si que es pot reduir en major mesura, és el nombre de punts de càrrega funcionant de forma simultània, que serà de 4, ja que com durant la tarda es realitzen pocs moviments i durant la nit cap, dona temps suficient per a carregar-los tots, estalviant en la factura de la potència contractada. En el cas de la recàrrega ràpida, com que són pocs els dies que s'ha d'utilitzar un vehicle dos cops, només s'instal·laria un.

Amb l'actual inserció del vehicle elèctric al sistema, les empreses elèctriques estan treballant per poder adaptar les tarifes a les necessitats d'aquest nou mercat. Amb les tarifes super-vall, amb tres franges horàries, es pot estalviar un 25% de la factura si es controlen les hores de càrrega amb l'escenari del 100% de les bateries. Si es controlés la necessitat del SOC per el dia següent, l'estalvi podria ser encara major. Comparant amb els VCI, l'estalvi arribaria fins un 400% en el cost per km.

Com el concepte de la recàrrega ràpida no es contempla un estalvi econòmic en el referent a la factura de l'electricitat, no s'ha optimitzat el preu, sinó que s'ha optat per fer el disseny de control per tal d'entendre el seu funcionament.. Com s'ha treballat amb models de convertidors simplificats, les pèrdues per commutació, transformadors o altres elements relacionats, no queden reflectides. Però s'ha pogut estudiar el comportament dels transitoris i el dimensionament dels elements elèctrics del sistema per tal d'obtenir uns millors resultats en els transitoris i que no superin els marges de seguretat marcats.

En definitiva, l'estudi per dimensionar les instal·lacions, l'optimització de la recàrrega i l'estudi de funcionament dels diferents punts, és important per la justificació tant econòmica com tècnica d'aquesta substitució de vehicles. Tot i que la inversió inicial pot semblar molt elevada, ja que els costos dels

VEs són elevats i s'hauria de fer obra en el pàrquing, els estalvis anuals que es podrien arribar aconseguir, junt amb la feina que es generaria i els beneficis mediambientals justifiquen a mig-llarg termini la inversió.

6.1. Treballs futurs

Tot i que el projecte és molt complert i personalment estic content amb els resultats obtinguts, voldria afegir que és un treball amb visió de futur i que pot ser ampliat en totes les seves parts:

- Es podria fer un estudi encara més específic de les rutes, forma d'ús i tipus de serveis que realitzen els vehicles actuals, per tal d'incentivar un menor ús del vehicle i intentar acoblar l'anomenat *car sharing* que ajudaria a disminuir la flota necessària i per tant els costos relacionats.
- La millora de l'algoritme d'optimització podria contenir una major predicció de la necessitat del SOC si prèviament es fa un estudi sobre les necessitats reals de cada servei pel següent dia. Per tant, la figura del gestor de càrregues, quedaria justificada degut a que l'estalvi podria augmentar.
- Tot i que la simulació ens ajuda a entendre el funcionament dels punts de càrrega, si es simulés la totalitat del procés (fins els 100% del SOC) i s'utilitzessin models de convertidors reals, es podrien analitzar les pèrdues reals i es podria afinar en el dimensionament de tots els elements inclosos els de control.

Pressupost

Aquest projecte s'ha elaborat mitjançant recollida de dades i simulació informàtica. Els costos per tant quedaran dividits en investigació i desenvolupament (I+D) i els costos del material utilitzat en el procés. Tant el GAMS® com el Matlab/Simulink® són softwares de pagament i per tant s'ha de considerar una llicència. Pel que fa els relacionats amb el Microsoft Office el preu és reduït ja que s'ha amortitzat en altres treball previs.

I+D	Temps (h)	Preu (€/h)	Total (€)
Investigació	150	27	4.050,00
Implementació dels algoritmes	150	27	4.050,00
Validació dels algoritmes	150	27	4.050,00
Anàlisi dels resultats	100	27	2.700,00
Redacció	50	27	1.350,00
TOTAL I+D	-	-	16.200,00

Taula 20. Pressupost de l'I+D desglossat.

Material informàtic	Unitats	Preu (€/h)	Total (€)
Portàtil ACER AS 1810T	0,5	500	250
Llicència Microsoft	0,25	99	24,75
Llicència Matlab/Simulink 2013b	1	2100	2100
Llicència GAMS	0,5	640	320
TOTAL material informàtic	-		2.694,75

Taula 21. Pressupost del material informàtic desglossat.

Subtotal	18.894,75 €
Costos operatius (10% subtotal)	1.889,48 €
TOTAL Brut	20.784,23 €
IVA. (21%)	4.364,69 €
TOTAL	25.153,92€

Taula 22. Pressupost final desglossat.

D'acord amb els costos desglossats en les taules anteriors, el pressupost d'execució material puja a la quantitat de vint mil set cents vuitanta-quatre euros amb vint-i-tres cèntims (20.784,23 €).

Per tant el pressupost d'execució per contracta, amb el 21% d'IVA inclòs, puja a un total de vint-i-cinc mil cent cinquanta-tres euros amb noranta-dos cèntims (25.153,92€), amb una vigència de sis mesos.

Data: Barcelona, Maig de 2015.

Firma: Joan Pujol Martínez.

Capítol 7:

Bibliografia

7.1. Referències bibliogràfiques

Bojrup, M., Karlsson, P., Alakula, M., and Simonsson, B. (1998, May). *A dual purpose battery charger for electric vehicles*. In Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE (Vol. 1, pp. 565-570). IEEE.

Chung, S. K. (2000). *A phase tracking system for three phase utility interface inverters*. Power Electronics, IEEE Transactions on, 15(3), 431-438.

Diputació de Barcelona, Recinte de l'Escola Industrial de Barcelona, departament de logística (Gener 2015). Totes les dades relacionades amb els vehicles a substituir.

EIA. Energy Institut of America. Gràfics del consum energètic mundial. <http://www.eia.gov/beta/MER/?tbl=T02.01#/?f=A&start=2000&end=2013&charted=3-6-9-12> (consulta gener 2015)

EPA. United States Environmental Protection Agency. Consulta dels consums reals dels VE. <http://www.fueleconomy.gov/> (Consulta abril 2015)

Farkas, C., and Prikler, L. (2012, March). *Stochastic modelling of EV charging at charging stations*. In international conference on renewable energies and power quality. ICREPQ, Santiago de Compostela (pp. 28-30).

Kuperman, A., Levy, U., Goren, J., Zafranski, A., Savernin, A., and Peled, I. (2010, November). *Modeling and control of a 50KW electric vehicle fast charger*. In Electrical and Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2010 IEEE 26th Convention of (pp. 000188-000192). IEEE.

Liserre, M., Blaabjerg, F., and Hansen, S. (2005). *Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier*. Industry Applications, IEEE Transactions on, 41(5), 1281-1291.

Mathworks. Tutorials i pistes per el Matlab/Simulink®. http://es.mathworks.com/index.html?s_tid=gn_logo (Gener-Abril 2015)

Olivella-Rosell, P., Villafafila-Robles, R., and Sumper, A. (2015). *Impact Evaluation of Plug-in Electric Vehicles on Power System*. In Plug In Electric Vehicles in Smart Grids (pp. 149-178). Springer Singapore.

Prieto Araujo, Eduardo, A. (Febrer, 2011). *Anàlisi dinàmica de xarxes multiterminal HVDC-VSC per al transport d'energia elèctrica en corrent continu en parcs eòlics marins*. Projecte Final de Carrera, UPC.

7.2. Bibliografia de consulta

Agustí Egea Álvarez, A. (Juny 2010). *Modelització, control i simulació de xarxes multiterminal de transport d'energia elèctrica en corrent continu (HVDC-VSC)*. Projecte Final de Màster, UPC.

Arancibia, A., and Strunz, K. (Març, 2012). *Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging*. In Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International (pp. 1-6). IEEE.

BP. "Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España." 2014

Chan, C. C. (2002). *The state of the art of electric and hybrid vehicles*. Proceedings of the IEEE, 90(2), 247-275.

Collados Rodríguez, Carlos, A. (Juny, 2014) *Optimización del flujo de potencia en parques eólicos marinos*. Treball Final de Grau, UPC.

Dharmakeerthi, C. H., Mithulananthan, N., and Saha, T. K. (Juliol, 2012). *Modeling and planning of EV fast charging station in power grid*. In Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE (pp. 1-8). IEEE.

Diariomotor. Estat del art de les bateries. <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/03/14/baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-automovil/> (consulta abril 2015)

Egea-Alvarez, A., Junyent-Ferré, A., and Gomis-Bellmunt, O. (2012). *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*. In Modeling and Control of Sustainable Power Systems (pp. 47-81). Springer Berlin Heidelberg.

Electric Vehicles News. Historia del automòbil fins 2009. <http://www.electricvehiclesnews.com/History/historyearly.htm> (consulta febrer 2015)

Electromaps. Mapa dels punts de càrrega de l'estat espanyol. <http://www.electromaps.com/puntos-de-recarga/mapa> (consulta abril 2015)

Enrique Castillo, A., Antonio J. Conejo, A., Pablo Pedregal, A., Ricardo García, A., y Natalia Alguacil, A. (2002) *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*.

EVNorway. Context del VE a Noruega. <http://www.evnorway.no/> (consulta febrer 2015)

Foley, A. M., Winning, I. J., and Gallachoir, B. P. O. (Setembre, 2010). *State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure*. In Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE (pp. 1-6). IEEE.

GAMS. Tutorial GAMS. <http://www.gams.com/dd/docs/gams/Tutorial.pdf> (consulta Març 2015).

Green Car Congress. Article sobre les bateries Alumini-Aire. <http://www.greencarcongress.com/2015/01/20150109-fuji.html> (consulta abril 2015)

ICAEN. Institut Català de l'Energia <http://icaen.gencat.cat/> (consulta febrer 2015)

Iberdrola. Tarifa SuperVall Plus. <https://www.iberdrola.es/clientes/autonomos/electricidad/mas-10kw/supervalle-plus> (consulta febrer 2015)

InsideEVs. Informació general sobre els VEs. <http://insideevs.com/> (consulta febrer 2015)

Jiménez Delgado, Carlos, A. (Octubre 2014). *Modelado de la demanda del vehículo eléctrico*. Treball Final de Grau, UPC.

Mitsubishi Motorsports. Mitsubishi Outlander PHEV, preus y versions 2015. <http://www.mitsubishi-motors.es/outlander-phev/> (consulta febrer 2015)

Motorpasion. Article sobre les bateries de grafit. <http://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/en-espana-se-ha-desarrollado-una-nueva-bateria-para-1-000-km-de-autonomia> (consulta abril 2015)

Nissan. Nissan Leaf, preus y versions 2015. <http://www.nissan.es/ES/es/vehicle/electric-vehicles/leaf/prices-and-equipment/prices-and-specifications.html> (consulta febrer 2015)

Olivella Rosell, Pol, A. (Desembre, 2012). *Modelado de la demanda de carga lenta y rápida de vehículos eléctricos para el estudio de impacto en la red de distribución*. Treball Final de Màster, UPC.

Park, M. Y., Chi, M. H., Park, J. H., Kim, H. G., Chun, T. W., and Nho, E. C. (Juny, 2010). *LCL-filter design for grid-connected PCS using total harmonic distortion and ripple attenuation factor*. In Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International (pp. 1688-1694). IEEE.

REE. Red Elèctrica Espanyola. Producció, distribució i demanda del sector elèctric espanyol. <http://www.ree.es/es/> (consulta febrer 2015)

Renault. Renault Twizy, preus y versions 2015. <http://www.electromaps.com/puntos-de-recarga/mapa> (consulta febrer 2015)

Valero-Bover, D.; Olivella-Rosell, P.; Villafafila-Robles, R.; Cestau-Cubero, S. (2014). *Performance analysis of an electric vehicle fleet for commercial purposes*. In Electric Vehicle Conference (IEVC) (pp. 1-6).

Zhou, X., Yu, X., Lukic, S., and Huang, A. (Setembre 2012). *LCL filter utilized in battery charging applications to achieve compact size and low ripple charging*. In Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE(pp. 660-665). IEEE.